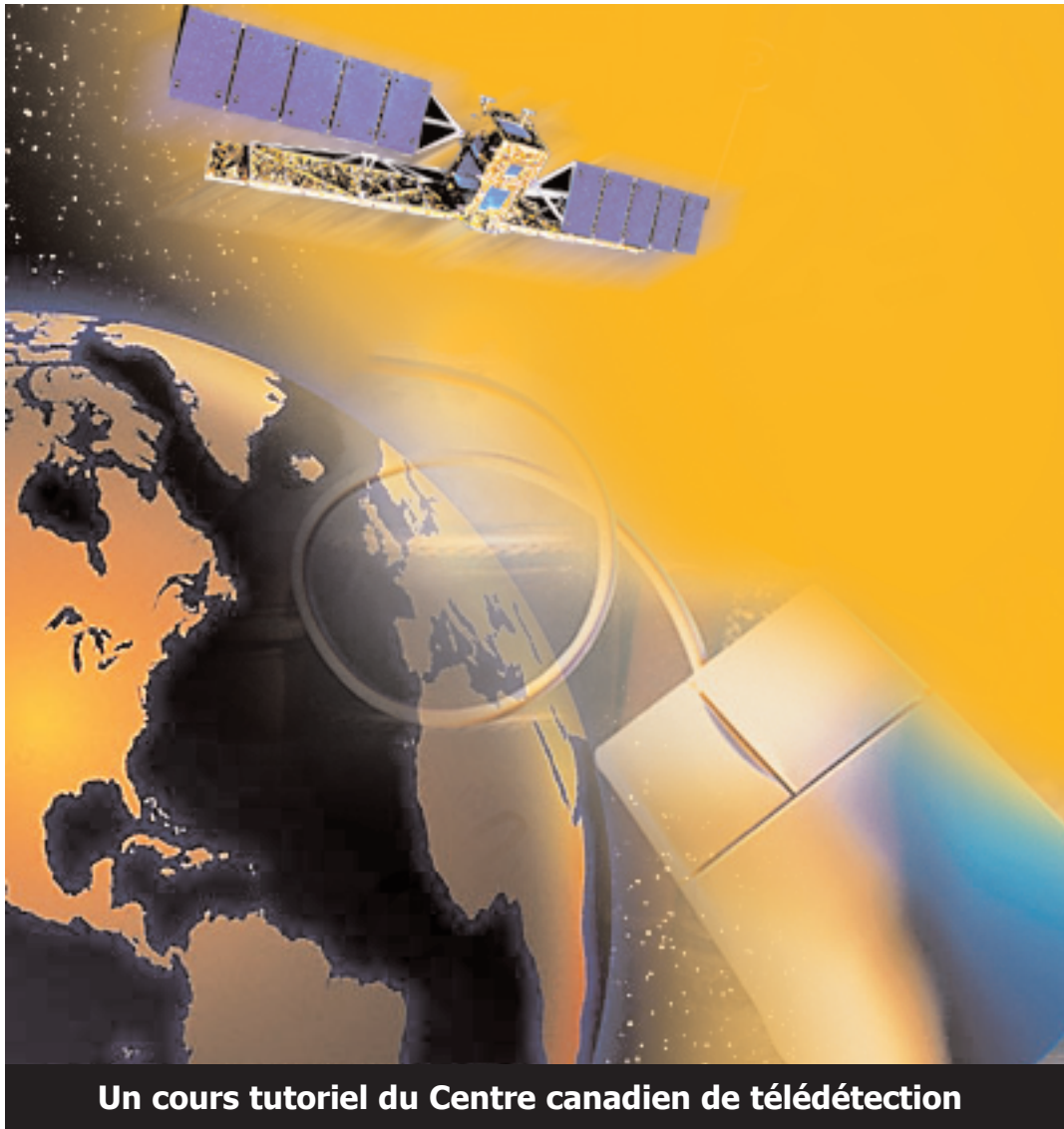


Notions fondamentales de télédétection



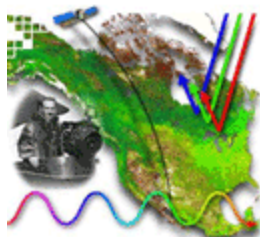


Table des matières

1. Introduction

1.1 Qu'est-ce que la télédétection ?	5
1.2 Le rayonnement électromagnétique	7
1.3 Le spectre électromagnétique	9
1.4 Interactions avec l'atmosphère	13
1.5 Interactions rayonnement-cible	17
1.6 Détection passive et active	20
1.7 Caractéristiques des images	21
1.8 Notes finales	23
Saviez-vous?	24
Questions éclaircs et réponses	28

2. Capteurs

2.1 Sur Terre, dans l'air et dans l'espace	35
2.2 Caractéristiques orbitales	37
2.3 Résolution	40
2.4 Résolution spectrale	42
2.5 Résolution radiométrique	44
2.6 Résolution temporelle	45
2.7 Photographie	46
2.8 Balayage multispectral	49
2.9 Infrarouge thermique	52
2.10 Distorsion géométrique	54
2.11 Observation météorologique	56
2.12 Observation de la Terre	62
2.13 Observation des océans	69
2.14 Autres détecteurs	72
2.15 Traitement des données	74
2.16 Notes finales	76
Saviez-vous?	77
Questions éclaircs et réponses	85

3. Hyperfréquences

3.1 Introduction	93
3.2 Principes	97
3.3 Géométrie & résolution	100
3.4 Distorsion	103
3.5 Interaction	107
3.6 Propriétés des images	111
3.7 Applications	115
3.8 Polarimétrie	118
3.9 Radars	124
3.10 Systèmes radar	126
3.11 Notes finales	130
Saviez-vous?	132
Questions éclaircs et réponses	136

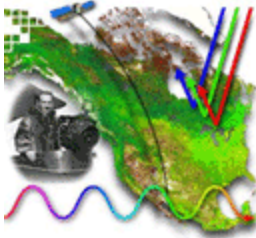
4. Analyse d'image

4.1 Introduction	142
4.2 Interprétation visuelle	145
4.3 Traitement d'images	148
4.4 Traitement	150
4.5 Rehaussement	155
4.6 Transformations	159
4.7 Classification	162
4.8 Intégration	165
4.9 Notes finales	168
Saviez-vous?	169
Questions éclaircs et réponses	172

5. Applications

5.1 Introduction	176
5.2 Agriculture	179
■ Type de récoltes	
■ Surveillance des récoltes	
5.3 Foresterie	187
■ Coupes à blanc	
■ Espèces	
■ Zones brûlées/li>	
5.4 Géologie	200
■ Formes de terrain	
■ Unités géologiques	
5.5 Hydrologie	208
■ Inondations	
■ Humidité du sol	

5.6 Glaces océaniques	215
■ Type et concentration	
■ Mouvements de la glace	
5.7 Couverture du sol	222
■ Changements rural/urbain	
■ Biomasse	
5.8 Cartographie	230
■ Planimétrie	
■ Modèle numérique d'altitude	
■ Thématique	
5.9 Surveillance côtière et océanique	240
■ Éléments océaniques	
■ Couleur et phytoplancton	
■ Déversements d'hydrocarbures	
5.10 Notes finales	248
Saviez-vous?	249
Questions éclair et réponses	258
Crédits	262
Permissions	264
Téléchargez	265
Notes pour les enseignants et les étudiants	266



1. Notions fondamentales de télédétection

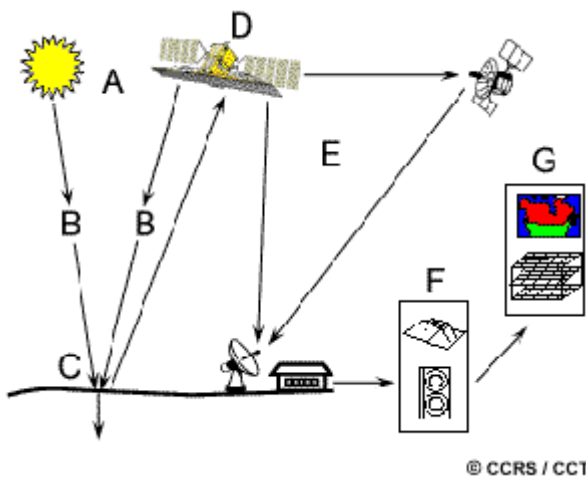
1 Introduction

1.1 Qu'est-ce que la télédétection ?

Pour les besoins de ce cours, nous définirons la télédétection comme suit :

« La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. »

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs.



1. Source d'énergie ou d'illumination (A) - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

2. Rayonnement et atmosphère (B) - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

3. Interaction avec la cible (C) - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

5. Transmission, réception et traitement (E) - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

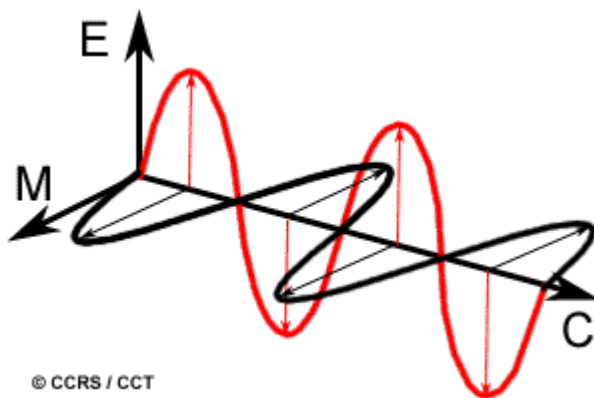
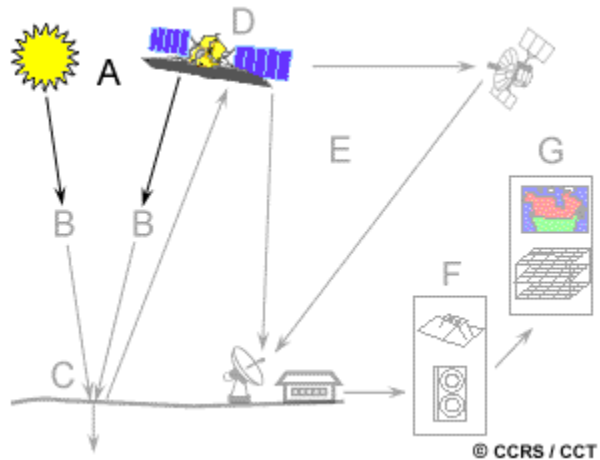
6. Interprétation et analyse (F) - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

7. Application (G) - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

Ces sept étapes couvrent le processus de la télédétection, du début à la fin. C'est dans cet ordre que tout au long de ce cours, nous vous invitons à construire, étape par étape, votre connaissance de la télédétection. Bon voyage !

1.2 Le rayonnement électromagnétique

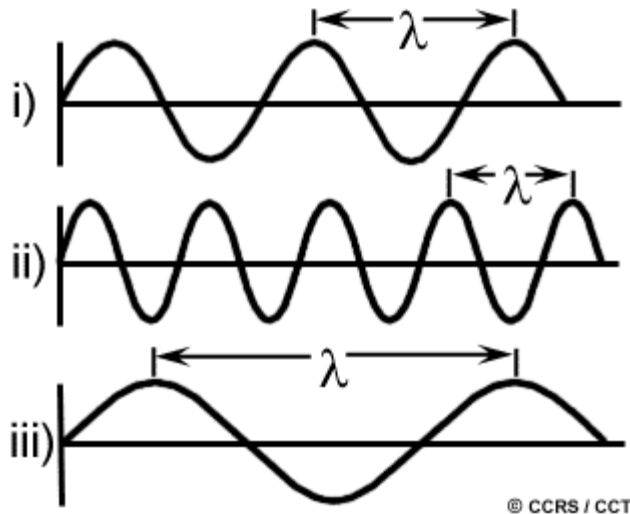
Premièrement, une source d'énergie sous forme de **rayonnement électromagnétique** est nécessaire pour illuminer la cible, à moins que la cible ne produise elle-même cette énergie.



Selon la théorie des ondes, tout rayonnement électromagnétique possède des propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible. Le rayonnement électromagnétique est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M). Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Le champ magnétique est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la

lumière (c).

Pour comprendre la télédétection, il est indispensable de saisir les deux composantes du rayonnement électromagnétique que sont la longueur d'onde et la fréquence.



La longueur d'onde équivaut à la longueur d'un cycle d'une onde, ce qui correspond à la distance entre deux crêtes successives d'une onde. La longueur d'onde est représentée habituellement par la lettre grecque lambda (λ), et est mesurée en mètres ou en l'un de ces sous-multiples tels que les **nanomètres** (nm, 10^{-9} mètre), **micromètres** (μm , 10^{-6} mètre) ou **centimètres** (cm, 10^{-2} mètre). La fréquence représente le nombre d'oscillations par unité de temps. La fréquence est normalement mesurée en Hertz (Hz) (c.-à-d. en oscillations par seconde) ou en multiples de **Hertz**. La formule suivante illustre la relation entre la longueur d'onde et la fréquence :

$$c = \lambda \nu$$

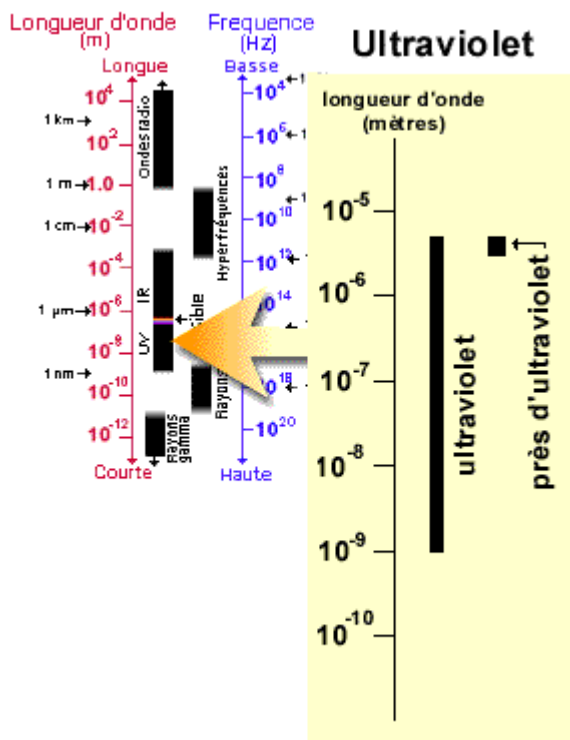
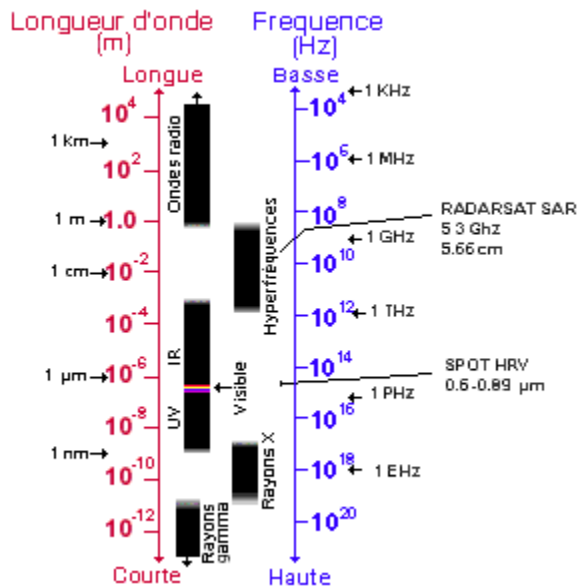
où :

λ = longueur d'onde
 ν = fréquence
 c = vitesse de la lumière

La longueur d'onde et la fréquence sont donc inversement proportionnelles, c'est-à-dire que plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse. Afin de comprendre l'information tirée des données de télédétection, il est essentiel de bien saisir les caractéristiques du rayonnement électromagnétique. Nous examinerons maintenant la classification du rayonnement électromagnétique.

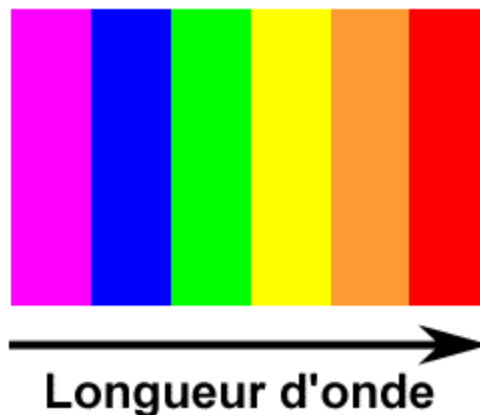
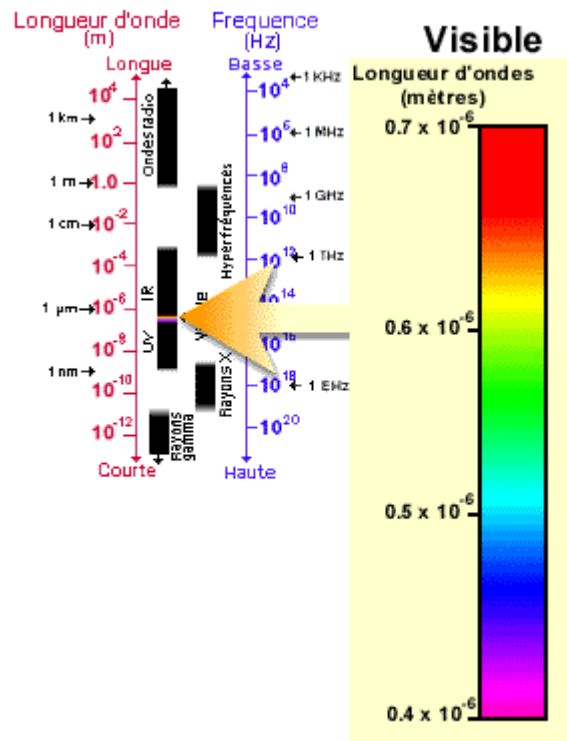
1.3 Le spectre électromagnétique

Le **spectre électromagnétique** s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique.



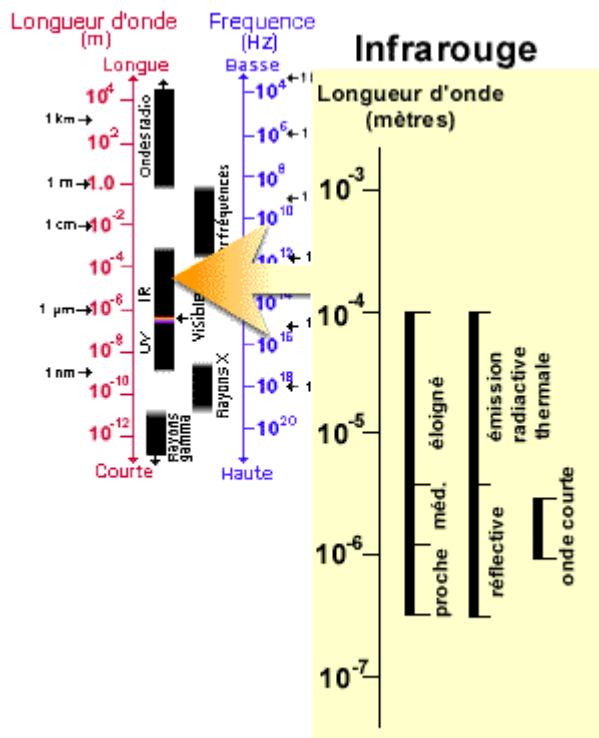
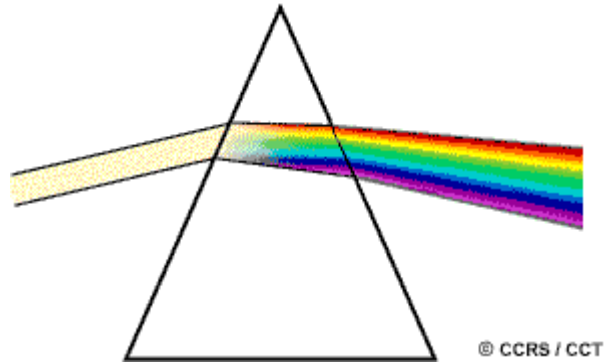
Les plus petites longueurs d'onde utilisées pour la télédétection se situent dans **l'ultraviolet**. Ce rayonnement se situe au-delà du violet de la partie du spectre visible. Certains matériaux de la surface terrestre, surtout des roches et minéraux, entrent en fluorescence ou émettent de la lumière visible quand ils sont illuminés par un rayonnement ultraviolet.

La lumière que nos yeux (nos tout premiers "capteurs de télédétection") peuvent déceler se trouve dans ce qui s'appelle le "spectre visible". Il est important de constater que le spectre visible représente un bien petite partie de l'ensemble du spectre. Une grande partie du rayonnement électromagnétique qui nous entoure est invisible à l'oeil nu, mais il peut cependant être capté par d'autres dispositifs de télédétection. Les longueurs d'onde visibles s'étendent de 0,4 à 0,7 mm. La couleur qui possède la plus grande longueur d'onde est le rouge, alors que le violet a la plus courte. Les longueurs d'onde du spectre visible que nous percevons comme des couleurs communes sont énumérées ci-dessous. Il est important de noter que c'est la seule portion du spectre que nous pouvons associer à la notion de couleurs.



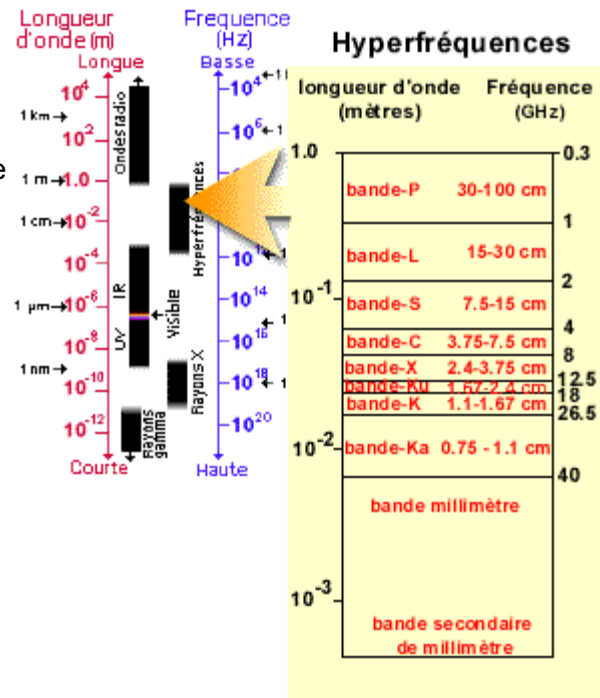
- **Violet** : 0.4 - 0.446 μm
- **Bleu** : 0.446 - 0.500 μm
- **Vert** : 0.500 - 0.578 μm
- **Jaune** : 0.578 - 0.592 μm
- **Orange** : 0.592 - 0.620 μm
- **Rouge** : 0.620 - 0.7 μm

Le bleu, le vert et le rouge sont les couleurs (ou les longueurs d'onde) primaires du spectre visible. Une couleur primaire ne peut être créée par deux autres couleurs, mais toutes les autres couleurs peuvent être créées en combinant les couleurs primaires. Même si nous voyons la lumière du Soleil comme ayant une couleur uniforme ou homogène, en réalité, elle est composée d'une variété de longueurs d'onde dans les parties de l'ultraviolet, du visible, et de l'infrarouge du spectre. La portion visible de ce rayonnement se décompose en ses couleurs composantes lorsqu'elle traverse un prisme. Le prisme réfracte la lumière de façon différente en fonction de la longueur d'onde.

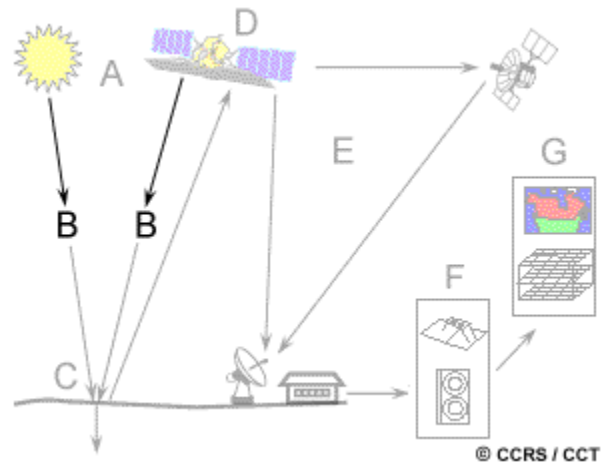


Examinons maintenant la partie de l'infrarouge (IR) du spectre. L'infrarouge s'étend approximativement de 0,7 à 100 μm , ce qui est un intervalle environ 100 fois plus large que le spectre visible. L'infrarouge se divise en deux catégories: **IR réfléchi** et **IR émis** ou **thermique**. Le rayonnement dans la région de l'infrarouge réfléchi est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible. L'infrarouge réfléchi s'étend approximativement de 0,7 à 3 μm . L'infrarouge thermique est très différent du spectre visible et de l'infrarouge réfléchi. Cette énergie est essentiellement le rayonnement qui est émis sous forme de chaleur par la surface de la Terre et s'étend approximativement de 3 à 100 μm .

Depuis quelques temps, la région des hyperfréquences suscite beaucoup d'intérêt en télédétection. Cette région comprend les plus grandes longueurs d'onde utilisées en télédétection et s'étend approximativement de 1 mm à 1 m. Les longueurs d'onde les plus courtes possèdent des propriétés semblables à celles de l'infrarouge thermique, tandis que les longueurs d'onde les plus grandes ressemblent aux ondes radio. La nature particulière des hyperfréquences et l'importance qu'elles revêtent pour la télédétection au Canada, nous ont incités à leur consacrer un chapitre entier du présent cours.

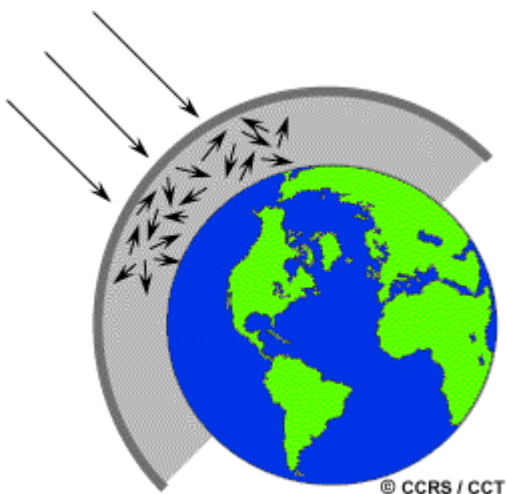


1.4 Interactions avec l'atmosphère



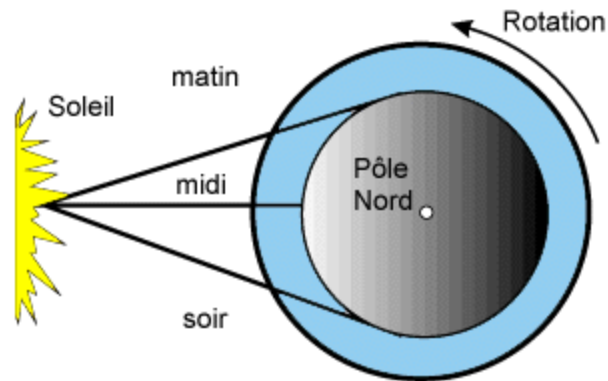
Avant que le rayonnement utilisé pour la télédétection n'atteigne la surface de la Terre, celui-ci doit traverser une **certaine épaisseur d'atmosphère**. Les particules et les gaz dans l'atmosphère peuvent dévier ou bloquer le rayonnement incident. Ces effets sont causés par les mécanismes de **diffusion** et d'**absorption**. La diffusion se produit lors de l'interaction entre le rayonnement incident et les particules ou les grosses molécules de gaz présentes dans l'atmosphère. Les particules dévient le rayonnement de sa trajectoire initiale. Le niveau de diffusion dépend de plusieurs facteurs comme la longueur d'onde, la densité de particules et de molécules, et l'épaisseur de l'atmosphère que le rayonnement doit franchir. Il existe trois types de diffusion :

- la diffusion de Rayleigh
- la diffusion de Mie
- la diffusion non-sélective.



La **diffusion de Rayleigh** se produit lorsque la taille des particules est inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. Celles-ci peuvent être soit des particules de poussière ou des molécules d'azote ou d'oxygène. La diffusion de Rayleigh disperse et dévie de façon plus importante les courtes longueurs d'onde que les grandes longueurs d'onde. Cette forme de diffusion est prédominante dans les couches supérieures de l'atmosphère.

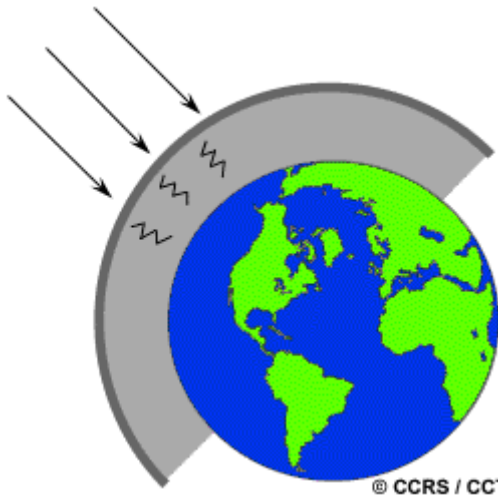
Ce phénomène explique pourquoi nous percevons un ciel bleu durant la journée. Comme la lumière du Soleil traverse l'atmosphère, les courtes longueurs d'onde (correspondant au bleu) du spectre visible sont dispersées et déviées de façon plus importante que les grandes longueurs d'onde. Au coucher et au lever du Soleil, le rayonnement doit parcourir une plus grande distance à travers l'atmosphère qu'au milieu de la journée. La diffusion des courtes longueurs d'onde est plus importante. Ce phénomène permet à une plus grande proportion de grandes longueurs d'onde de pénétrer l'atmosphère.



On parle de **diffusion de Mie** lorsque les particules sont presque aussi grandes que la longueur d'onde du rayonnement. Ce type de diffusion est souvent produite par la poussière, le pollen, la fumée et l'eau. Ce genre de diffusion affecte les plus grandes longueurs d'onde et se produit surtout dans les couches inférieures de l'atmosphère où les grosses particules sont plus abondantes. Ce processus domine quand le ciel est ennuagé.

Le troisième type de diffusion est celui de la **diffusion non-sélective**. Ce genre de diffusion se produit lorsque les particules (les gouttes d'eau et les grosses particules de poussière) sont beaucoup plus grosses que la longueur d'onde du rayonnement. Nous appelons ce genre de diffusion "non-sélective", car toutes les longueurs d'onde sont dispersées. Les gouttes d'eau de l'atmosphère dispersent le bleu, le vert, et le rouge de façon presque égale, ce qui produit un rayonnement blanc (lumière bleue + verte + rouge = lumière blanche). C'est pourquoi le brouillard et les nuages nous paraissent blancs.



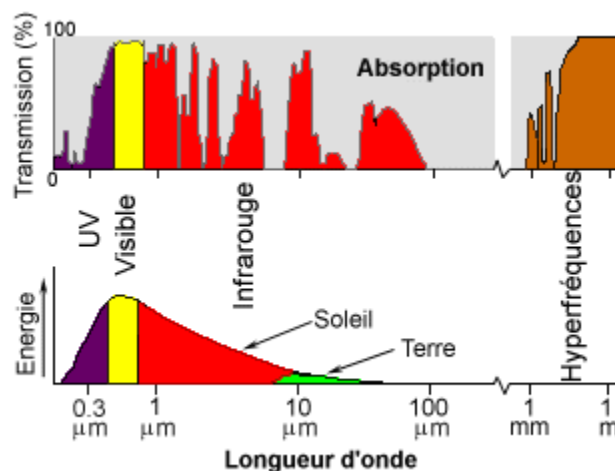


Un autre phénomène entre en jeu lorsque le rayonnement électromagnétique interagit avec l'atmosphère : c'est l'**absorption**. L'absorption survient lorsque les grosses molécules de l'atmosphère (ozone, bioxyde de carbone et vapeur d'eau) absorbent l'énergie de diverses longueurs d'onde.

L'ozone absorbe les rayons ultraviolets qui sont néfastes aux êtres vivants. Sans cette couche de protection dans l'atmosphère, notre peau brûlerait lorsqu'elle est exposée au Soleil.

Vous avez peut-être entendu dire que le bioxyde de carbone est un gaz qui contribue à l'effet de serre. Ce gaz absorbe beaucoup de rayonnement dans la portion infrarouge thermique du spectre et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère.

La vapeur d'eau dans l'atmosphère absorbe une bonne partie du rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'onde et des hyperfréquences de petites longueurs d'onde qui entrent dans l'atmosphère (entre 22 μ m et 1m). La présence d'eau dans la partie inférieure de l'atmosphère varie grandement d'un endroit à l'autre et d'un moment à l'autre de l'année. Par exemple, une masse d'air au-dessus d'un désert contient très peu de vapeur d'eau pouvant absorber de l'énergie, tandis qu'une masse d'air au-dessus des tropiques contient une forte concentration de vapeur d'eau.



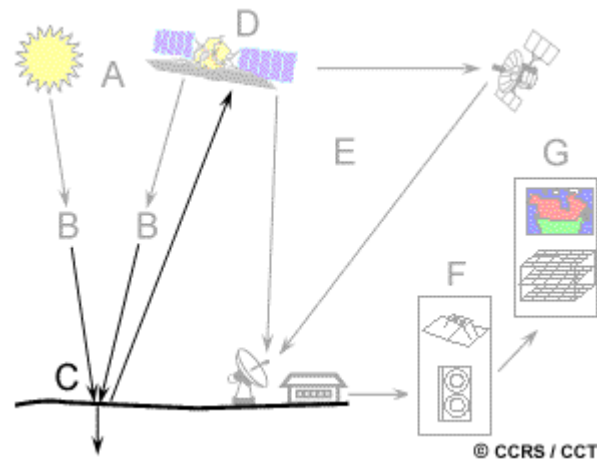
Parce que ces gaz et ces particules absorbent l'énergie électromagnétique dans des régions spécifiques du spectre, ils influencent le choix de longueurs d'onde utilisées en télédétection. Les régions du spectre qui ne sont pas influencées de façon importante par l'absorption

atmosphérique, et qui sont donc utiles pour la télédétection, sont appelées les fenêtres atmosphériques. En comparant les caractéristiques des deux sources d'énergie les plus communes (le Soleil et la Terre) avec les fenêtres atmosphériques disponibles, nous pouvons identifier les **longueurs d'onde les plus utiles pour la télédétection**. La portion visible du spectre correspond à une fenêtre et au niveau maximal d'énergie solaire. Notez aussi que l'énergie thermique émise par la Terre correspond à une fenêtre située à près de 10 mm dans la partie de l'infrarouge thermique du spectre. Dans la partie des hyperfréquences, il existe une grande fenêtre qui correspond aux longueurs d'onde de plus de 1 mm.

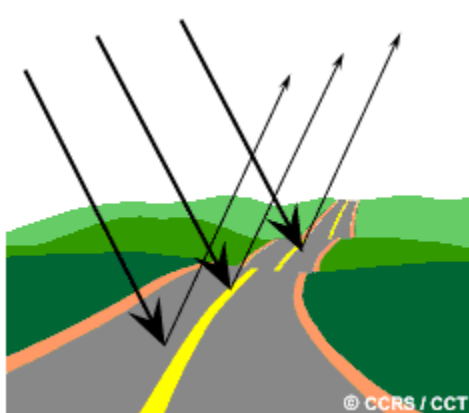
Maintenant que nous comprenons comment l'énergie électromagnétique se rend de sa source à la surface de la Terre (et nous pouvons constater que c'est un voyage difficile), nous allons examiner ce qu'il advient du rayonnement une fois qu'il atteint la surface.

1.5 Interactions rayonnement-cible

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber (**A**) l'énergie, la transmettre (**T**) ou réfléchir (**R**) l'énergie incidente. L'énergie incidente totale interagira avec la surface selon l'une ou l'autre de ces trois modes d'interaction ou selon leur combinaison. La proportion de chaque interaction dépendra de la longueur d'onde de l'énergie, ainsi que de la nature et des conditions de la surface.

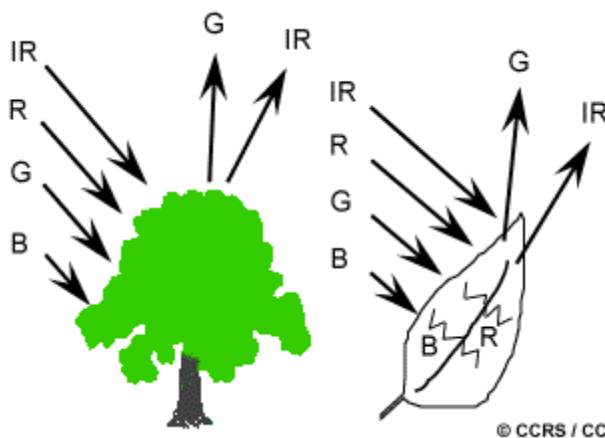


L'absorption (**A**) se produit lorsque l'énergie du rayonnement est absorbée par la cible, la transmission (**B**) lorsque l'énergie du rayonnement passe à travers la cible et la réflexion (**C**) lorsque la cible redirige l'énergie du rayonnement. En télédétection, nous mesurons le rayonnement réfléchi par une cible. La **réflexion spéculaire** et la **réflexion diffuse** représentent deux modes limites de réflexion de l'énergie.



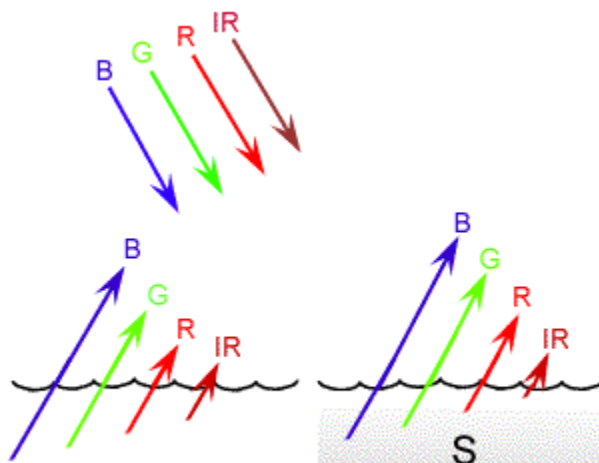
Une surface lisse produit une réflexion spéculaire, c'est-à-dire que toute l'énergie est redirigée dans une même direction (comme c'est le cas d'un miroir). La réflexion diffuse se produit quand la surface est rugueuse, ce qui redirige l'énergie uniformément dans toutes les directions. La plupart des objets de la surface terrestre se situent entre ces deux extrêmes. La façon dont une cible réfléchit le rayonnement dépend de l'amplitude de la rugosité de la surface par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident. Si la longueur d'onde du rayonnement est beaucoup plus petite que la rugosité de la surface ou que la grosseur des particules qui composent la surface, la réflexion diffuse domine. Par exemple, un sable fin paraît uniforme aux rayonnements à grandes longueurs d'onde, mais rugueux aux longueurs d'onde visibles.

Examinons quelques exemples de cibles de la surface de la Terre et voyons comment l'énergie aux longueurs d'onde visible et infrarouge interagit avec celles-ci.



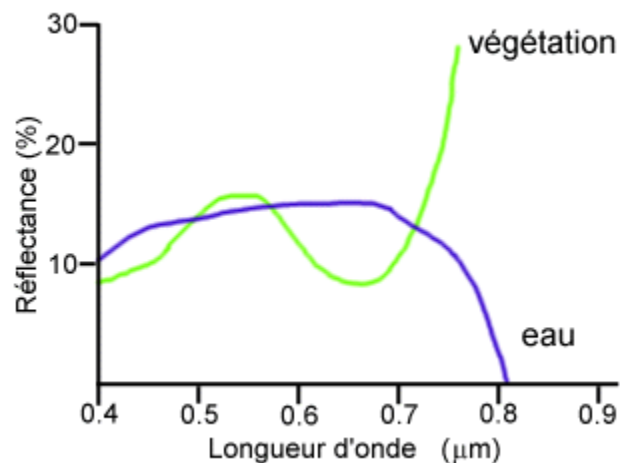
Les feuilles : la chlorophylle, une molécule que nous retrouvons à l'intérieur des feuilles, absorbe fortement le rayonnement aux longueurs d'onde du rouge et du bleu, mais réfléchit le vert. Les feuilles, qui contiennent un maximum de chlorophylle en été, sont donc plus vertes pendant cette saison. En automne, les feuilles qui contiennent alors moins de chlorophylle, absorbent moins de rouge, et paraissent donc rouges ou jaunes (le jaune est une combinaison des longueurs d'onde du

vert et du rouge). La structure interne des feuilles en santé agit comme un excellent réflecteur diffus pour les longueurs d'onde de l'infrarouge. Si nos yeux pouvaient percevoir l'infrarouge, les feuilles paraîtraient très éclatantes sous ces longueurs d'onde. Les scientifiques utilisent d'ailleurs l'infrarouge pour déterminer l'état de santé de la végétation.



L'eau : l'eau absorbe davantage les grandes longueurs d'onde du rayonnement visible et du proche infrarouge. Ainsi, l'eau paraît généralement bleue ou bleu-vert car elle réfléchit davantage les petites longueurs d'onde, elle paraît encore plus foncée si elle est observée sous les longueurs d'onde du rouge ou du proche infrarouge. Lorsque les couches supérieures de l'eau contiennent des sédiments en suspension, la transmission diminue, la réflexion augmente et l'eau paraît plus brillante. La couleur de

l'eau se déplacera légèrement vers les plus grandes longueurs d'onde. Nous confondons parfois l'eau qui contient des sédiments en suspension avec l'eau peu profonde et claire, car ces deux phénomènes paraissent très semblables. La chlorophylle dans les algues absorbe plus de bleu et réfléchit plus de vert. L'eau paraît donc plus verte quand elle contient des algues. L'état de la surface de l'eau (rugueuse, lisse, vagues, débris flottants, etc.) peut aussi susciter des problèmes dans l'interprétation à cause de la réflexion spéculaire et des autres influences sur la couleur et la brillance.

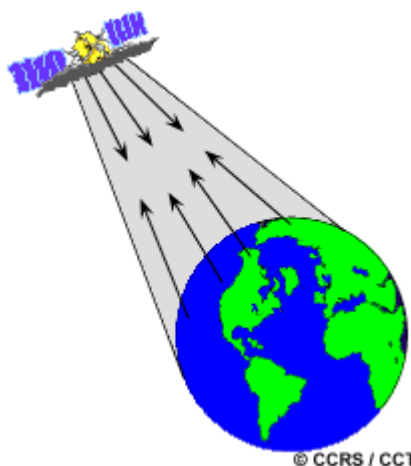
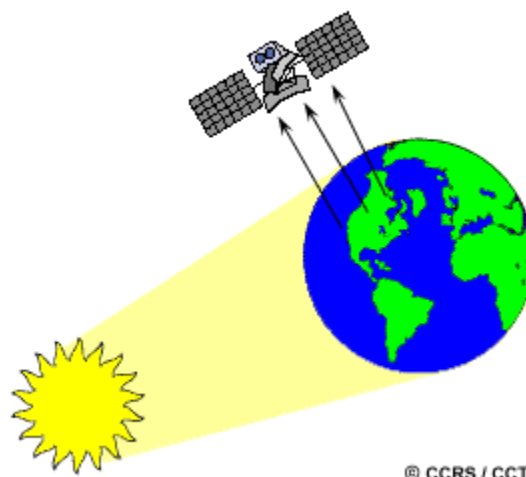


Ces exemples démontrent que nous observons des réponses très différentes aux mécanismes d'absorption, de transmission et de réflexion selon la composition de la cible et la longueur d'onde du rayonnement qui lui est propre. En mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. En comparant les signatures de différents objets, nous pouvons les distinguer les uns des autres, alors que nous ne pourrions peut-être pas les distinguer si nous les comparions seulement avec une longueur d'onde.

Par exemple, l'eau et la végétation peuvent avoir une signature spectrale similaire aux longueurs d'onde visibles, mais sont presque toujours différenciables dans l'infrarouge. Les signatures spectrales peuvent être très variables pour la même sorte de cible et peuvent aussi varier dans le temps et dans l'espace. Pour interpréter correctement l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la surface, il est important de savoir où regarder dans le spectre et de comprendre les facteurs qui influencent la signature spectrale de la cible.

1.6 Détection passive et active

Jusqu'à maintenant, dans ce chapitre, nous avons vu que le Soleil est une source d'énergie ou de rayonnement pratique pour la télédétection. L'énergie du Soleil est soit **réfléchie** (la portion visible) ou absorbée et **retransmise** (infrarouge thermique) par la cible. Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible naturellement sont des capteurs passifs. Le capteur passif peut seulement percevoir l'énergie réfléchie lorsque le Soleil illumine la Terre. Il n'y a donc pas d'énergie solaire réfléchie le soir, tandis que l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être perçue le jour ou la nuit.



Un capteur actif produit sa propre énergie pour illuminer la cible : il dégage un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible. Le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur. Le capteur actif a l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs utilisent les longueurs d'onde qui ne sont pas produites en quantité suffisante par le Soleil telles que les hyperfréquences ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est illuminée. Par contre, les capteurs actifs doivent produire une énorme quantité d'énergie pour bien illuminer une cible. Le laser fluoromètre et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.

1.7 Caractéristiques des images

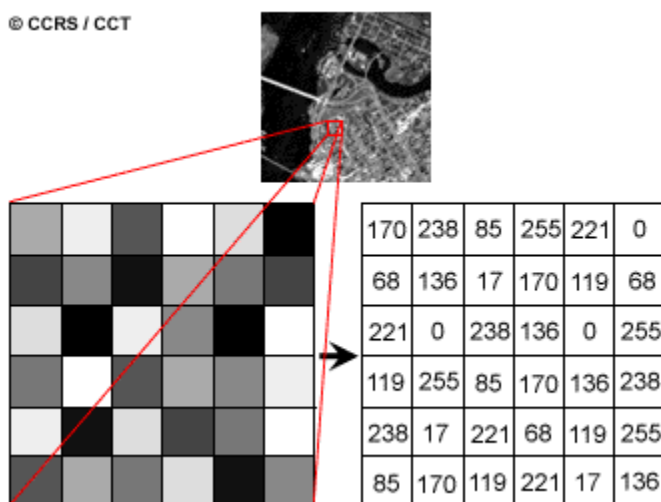
Avant de passer au prochain chapitre qui traite des capteurs et de leurs caractéristiques, nous devons définir et expliquer quelques termes et concepts fondamentaux associés aux images de télédétection.



L'énergie électromagnétique peut être perçue de façon photographique ou de façon électronique. Le processus photographique utilise une réaction chimique sur une surface sensible à la lumière pour capter et enregistrer les variations d'énergie. Il est important, en télédétection, de distinguer les termes "image" et "photographie". Une image est une représentation graphique, quels que soit la longueur d'onde ou le dispositif de télédétection qui ont été utilisés pour capter et enregistrer l'énergie électromagnétique. Une photographie désigne spécifiquement toute image captée et enregistrée sur

une pellicule photographique. La photo noir et blanc, à gauche, représentant une partie de la ville d'Ottawa au Canada, a été obtenue grâce à la partie visible du spectre. Les photographies enregistrent habituellement les longueurs d'onde entre 0,3 et 0,9 mm (les portions visible et infrarouge réfléchi). Avec ces définitions, nous constatons que toute photographie est une image, mais que les images ne sont pas toutes des photographies. À moins de parler d'images enregistrées par un procédé photographique, nous utilisons donc le terme image.

© CCRS / CCT

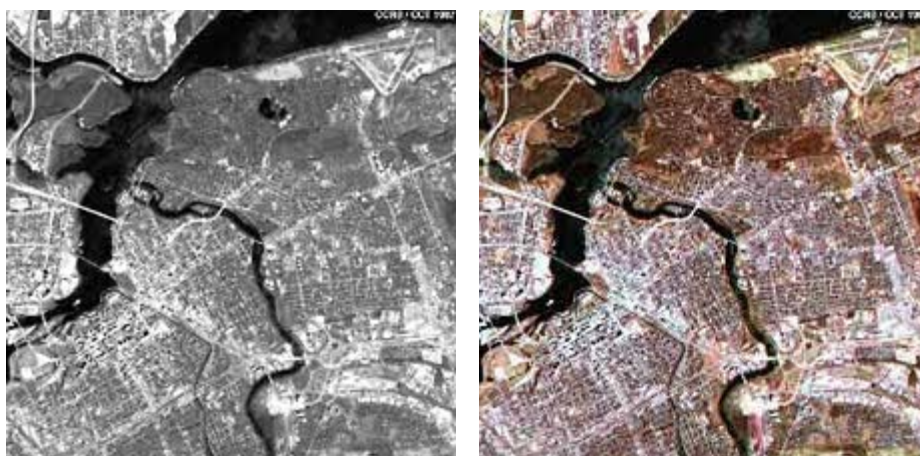


Une photographie peut être présentée et affichée en format numérique en divisant l'image en petits morceaux de taille et de forme égales, que nous nommons pixels. La luminosité de chaque pixel est représentée par une valeur numérique. C'est exactement ce qui a été fait à la photographie de gauche. En effet, en appliquant les définitions présentées plus haut, nous déduisons que l'image est vraiment une image numérique de la photographie originale ! Cette photographie a été numérisée et subdivisée en pixels.

Chaque pixel a été doté d'une valeur représentant les différents niveaux de luminosité. L'ordinateur affiche chaque valeur numérique comme un niveau de luminosité. Les capteurs enregistrent alors électroniquement l'énergie en format numérique (en rangées de chiffres).

Ces deux différentes façons de représenter et d'afficher les données de télédétection, par des moyens photographiques ou numériques, sont interchangeables car elles représentent la même information (mais chaque conversion peut engendrer une perte de précision).

Dans la section précédente, nous avons décrit la portion visible du spectre et le concept de couleur. Nous percevons les couleurs parce que nos yeux captent la gamme entière des longueurs d'onde visibles et notre cerveau transforme cette information en couleurs distinctes. Imaginez le monde si nous ne pouvions percevoir qu'une seule bande étroite de longueurs d'onde ou de couleur ! De nombreux capteurs fonctionnent de cette façon. L'information d'une gamme étroite de longueur d'onde est captée et emmagasinée sous forme numérique dans un fichier représentant la bande de longueurs d'onde. Il est ensuite possible de combiner et d'afficher de ces bandes d'information numérique en utilisant les trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu). Les données de chaque bande sont représentées comme une couleur primaire et, selon la luminosité relative (c.-à-d. valeur numérique) de chaque pixel dans chaque bande, les couleurs se combineront en proportions différentes pour produire des couleurs distinctes.



Lorsque nous utilisons cette méthode pour afficher une seule bande ou gamme de longueurs d'onde, nous affichons réellement cette bande avec les trois couleurs primaires. Parce que la luminosité de chaque pixel est la même pour chaque couleur primaire, les couleurs se combinent et produisent une image en noir et blanc. L'image est donc affichée avec ses différentes teintes de gris, de noir à blanc. Lorsque nous affichons plus d'une bande, chaque bande ayant une couleur primaire différente, le niveau de luminosité peut être différent pour chaque combinaison de bandes ou de couleurs primaires, et les couleurs se combinent pour former un composé couleurs.

1.8 Notes finales

Vous venez de compléter le Chapitre 1 - Les principes fondamentaux de la télédétection.

Vous pouvez entamer le [Chapitre 2 - Satellites et Capteurs](#)¹ ou aller fureter sur le site Web du CCT pour découvrir d'autres articles reliés aux principes fondamentaux de la télédétection.

Par exemple, vous aimeriez peut-être jeter un coup d'oeil à certaines définitions [conventionnelles](#)² ou [moins conventionnelles](#)³ de la télédétection.

Nous vous offrons une explication qui, calculs à l'appui, vous indique à quel point vous devriez vous inquiéter des [effets des radiations émises par RADARSAT](#)⁴, le premier satellite canadien.

Les chercheurs de la Section de surveillance environnementale du CCT utilisent leurs connaissances de l'interaction des radiations avec l'atmosphère pour produire divers « [produits de radiations](#) »⁵. Jetez-y un coup d'oeil !

Vous voulez savoir comment ces divers éléments [eau](#)⁶, [roches](#)⁷, [glace](#)⁸, [constructions humaines](#)⁹, and [déversements d'hydrocarbures](#)¹⁰ interagissent avec les micro-ondes ?

Notre « [Glossaire de télédétection](#) »¹¹. Cherchez sur le site pour trouver les termes spécifiques qui vous intéressent ou pour réviser les termes dans la catégorie « phénomènes ».

¹<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

²http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/definition/convdef_e.html

³http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/definition/unconvdef_e.html

⁴http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/fun/radiation/radiation_e.html

⁵http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/apps/landcov/rad/emrad_e.html

⁶http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/man/rman01_e.html

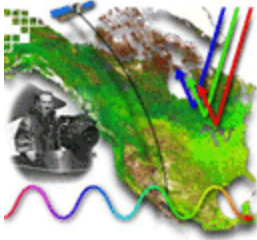
⁷http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/nwt/rnwt01_e.html

⁸http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/pei/rpei01_e.html

⁹http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/ana/cnfdbrig/confed_e.html

¹⁰http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/uk/ruk01_e.html

¹¹http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary/glossary_e.html



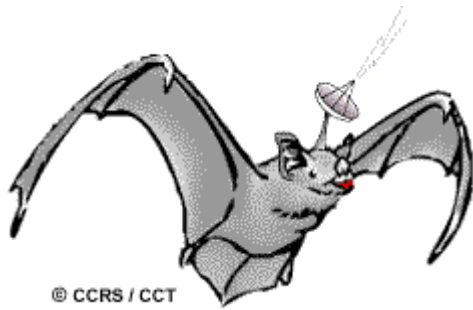
1. Saviez-vous que...?

1.1 Le saviez-vous?



Trois de nos cinq sens (la vue, le toucher, l'ouïe, le goût, l'odorat et le toucher) peuvent être considérés comme une forme de télédétection, puisque la source d'information est à distance. Les deux autres sont directement en contact avec la source d'information - de quels sens s'agit-il ?

1.2 Saviez-vous que...?



© CCRS / CCT

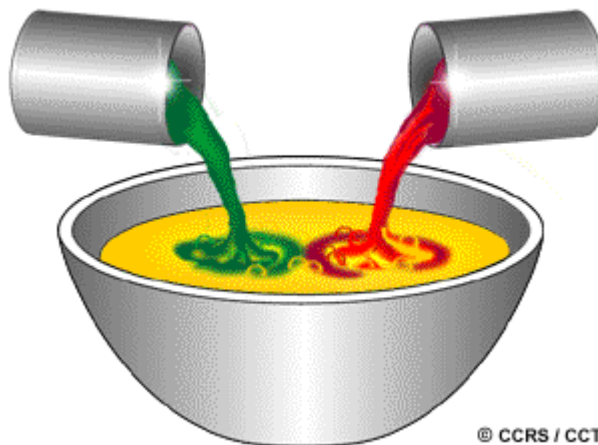
... Les ultrasons, cartes météorologiques satellitaires, radars de contrôle de vitesse, photos de graduation et sonars (ceux des bateaux et ceux des chauves-souris !) peuvent tous être considérés comme des formes de télédétection. Les hôpitaux utilisent la tomodensitométrie, la résonance magnétique (qui produit des images en trois dimensions de tissus humains), les ultrasons et les rayons-x, pour créer des images de notre corps. Toutes ces techniques sont des

exemples de télédétection non-intrusives (invasive).

... Vous pouvez utiliser un oscilloscope, instrument électronique qui permet de visualiser des ondes semblables au rayonnement électromagnétique, pour voir la longueur d'onde et la fréquence de votre voix. Les sons aigus ont des longueurs d'onde courtes et des fréquences élevées, tandis que les sons graves possèdent une fréquence basse et une grande longueur d'onde. Selon les scientifiques, la Terre vibre à très basse fréquence, ce qui produit un son trop bas pour être perçu par une oreille humaine. Le même principe (appliqué aux ondes lumineuses) est utilisé par les astronomes pour calculer la vitesse d'éloignement de certaines étoiles.

Les notions de longueur d'onde et de fréquence sont importantes pour la compréhension du décalage Doppler. Le décalage Doppler explique pourquoi les ondes sonores et lumineuses sont perçues comme étant comprimées ou dilatées si l'objet qui les produit bouge par rapport au récepteur. Par exemple, quand un train ou une automobile de course se dirige vers nous, nous entendons des sons de fréquence de plus en plus élevée, jusqu'à ce que l'objet nous atteigne. Lorsque l'objet s'éloigne de nous, nous entendons des sons de fréquence de plus en plus basse. En astronomie, on applique le même principe à la lumière pour déterminer la vitesse de déplacement des étoiles par rapport à nous (mesure du décalage vers le rouge).

1.3 Saviez-vous que...?

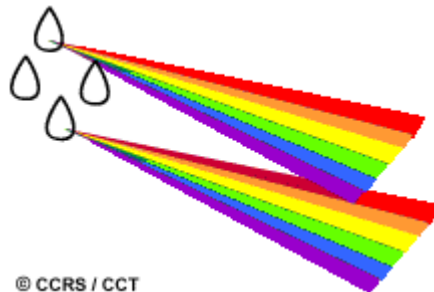


© CCRS / CCT

La « **teinte** » et la « **saturation** » sont deux caractéristiques indépendantes de la couleur. La « teinte » réfère à la longueur d'onde de la lumière, ce que nous appelons habituellement la couleur. La « saturation » est une mesure de la pureté de la couleur et indique la quantité de blanc mélangée à la couleur. Par exemple, la couleur « rose » peut être considérée comme de la couleur « rouge » qui n'est pas saturée.

1.4 Saviez-vous que...?

« ...Désolés, pas de trésor au bout de cet arc-en-ciel... »



Chaque gouttelette d'eau agit comme un petit prisme. Quand la lumière du Soleil traverse les gouttelettes, les ondes composantes sont déviées différemment selon leurs longueurs respectives. Les couleurs individuelles de la lumière du Soleil sont alors visibles, ce qui produit un arc-en-ciel. Les petites longueurs d'onde (violet, bleu) se situent vers l'intérieur de l'arc-en-ciel, et les grandes vers l'extérieur (orange, rouge).

... Sans la diffusion du rayonnement dans l'atmosphère, les ombrages paraîtraient noirs au lieu de gris. La diffusion donne une certaine luminosité à l'atmosphère, par suite de la dispersion de la lumière du Soleil qui illumine les objets situés dans l'ombre.

1.5 Saviez-vous que...?

« Voilà matière à réflexion... »



... Les couleurs que nous percevons sont une combinaison des interactions du rayonnement (absorption, transmission et réflexion) et représentent les longueurs d'onde reflétées. Si toutes les longueurs d'onde visibles sont reflétées par un objet, celui-ci paraît blanc, tandis qu'un objet qui absorbe toutes les longueurs d'onde visibles paraît sans couleurs (ou noir).

1.6 Saviez-vous que...?

« Souriez... »

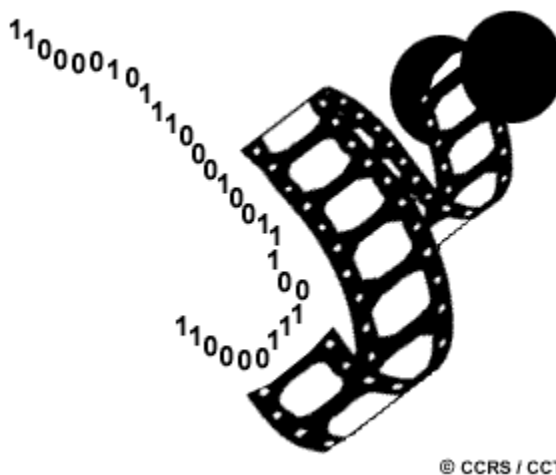
...Un appareil photo est un bon exemple d'un capteur passif et actif. Durant une journée ensoleillée, il y a assez de lumière qui illumine la cible pour que la caméra enregistre le rayonnement qui est reflété vers sa lentille (mode passif). Lors d'une journée nuageuse ou à l'intérieur, souvent il n'y a pas assez de lumière pour que la caméra enregistre adéquatement la cible. Pour combler le manque de rayonnement, la caméra utilise sa propre source d'énergie (un flash) pour illuminer la cible (mode actif).

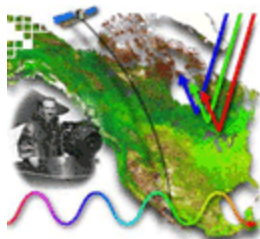
... Le radar utilisé par la patrouille routières pour mesurer la vitesse des véhicules est un exemple de télédétection active. Lorsque l'appareil radar est pointé vers un véhicule, des impulsions de rayonnement sont émises. La réflexion de ce rayonnement est mesurée et chronométrée. On détermine la vitesse du véhicule en calculant le délai entre les émissions répétées et la réception des pulsations. La vitesse peut être calculée avec précision parce que la vitesse de déplacement du rayonnement est beaucoup plus élevée que la vitesse du véhicule à moins de voyager à la vitesse de la lumière.



1.7 Saviez-vous?

La pellicule photographique peut enregistrer des détails spatiaux extrêmement fins puisque chaque molécule d'halogénure d'argent peut enregistrer une quantité de lumière différente de la molécule voisine. Par contre, les capteurs numériques ont une sensibilité radiométrique et spectrale beaucoup plus fine. Ces capteurs sont capables de discerner des bandes spectrales très étroites (permettant d'établir la signature spectrale d'une cible) et d'enregistrer plusieurs milliers de niveau d'intensité d'énergie.





1. Questions éclairs et réponses

1.1 Question éclair



Est-ce que la télédétection peut utiliser autre chose que l'énergie électromagnétique?

1.1 Réponse

Bien qu'il soit généralement admis que le terme « télédétection » implique l'utilisation de l'énergie électromagnétique, une définition plus générale présentant la télédétection comme une « méthode d'acquisition à distance » ne restreint pas le type d'énergie au spectre électromagnétique. Par exemple, une conversation téléphonique peut être considérée comme un type de télédétection.

1.2 Questions éclaircs

Le premier élément nécessaire à la télédétection est une source d'énergie pour illuminer une cible. Quelle est d'après vous la source d'énergie électromagnétique la plus abondante à laquelle nous ayons accès ? Quel est le dispositif de télédétection que nous utilisons pour percevoir cette énergie?



Si la vitesse de la lumière est de 3×10^8 m/s, calculez la longueur d'onde d'un rayonnement qui possède une fréquence de 500 000 Ghz (Ghz = gigahertz = 10^9 Hz). Exprimez votre réponse en micromètre (μm).

1.2 Réponses

1. Le Soleil est la source d'énergie électromagnétique la plus abondante, et est utilisé comme source d'énergie initiale principale en télédétection. Nos yeux sont les dispositifs de télédétection que nous utilisons pour capter le rayonnement du Soleil. Ils peuvent être considérés comme des capteurs de télédétection (et ils sont très bons) car ils captent la lumière visible du Soleil, ce qui nous permet de voir. Il existe d'autres types de lumière qui sont invisibles à l'oeil nu... nous en discuterons plus loin.

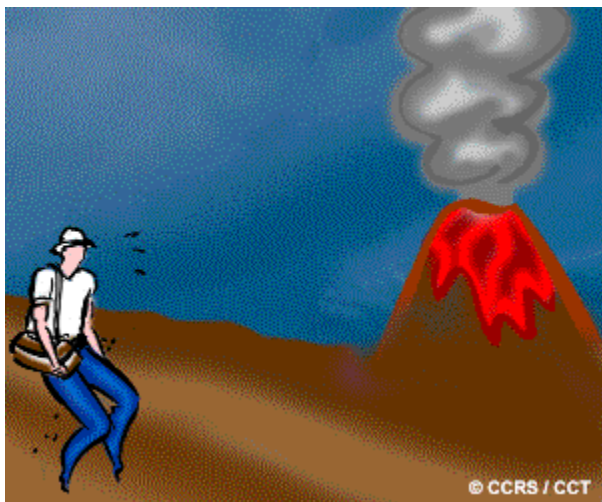


$$\begin{aligned} c &= \lambda \nu \\ 3 \times 10^8 &= \lambda (500,000 \times 10^9) \\ 3 \times 10^8 &= \lambda (5 \times 10^{14}) \\ 3 \times 10^8 / 5 \times 10^{14} &= \lambda \\ 6 \times 10^{-7} \text{ metres} &= \lambda \end{aligned}$$

En utilisant l'équation qui démontre la relation entre la longueur d'onde et la fréquence, nous pouvons calculer la longueur d'onde du rayonnement qui possède une fréquence de 500 000 Ghz.

1.3 Questions éclaircs

La partie infrarouge du spectre électromagnétique est divisée en une partie dite de réflexion et une partie d'émission. Est-il possible de prendre des photographies dans ces longueurs d'ondes?



1.3 Réponse

Oui et non ! Il existe des pellicules noir et blanc et des pellicules couleurs qui sont sensibles à la partie réfléchie de la partie infrarouge du spectre. Ces pellicules sont utilisées à des fins de recherche scientifique et aussi pour la photographie artistique. Toutefois, il n'existe aucune pellicule permettant d'enregistrer la partie émise du rayonnement infrarouge (la chaleur). Si elles étaient disponibles, ces pellicules devraient être conservées en permanence à des températures très basses, ce qui ne serait pas très pratique. Heureusement, il existe de nombreux appareils électroniques qui permettent de détecter et d'enregistrer des images de la partie émise du rayonnement électromagnétique.

1.4 Questions éclairs



1. La plupart des systèmes de télédétection ne captent pas et n'enregistrent pas les longueurs d'onde des parties ultraviolette et bleue du spectre. Pouvez-vous expliquer pourquoi?

2. Identifiez les meilleures conditions atmosphériques pour la télédétection utilisant la partie visible du spectre.

1.4 Réponses



1. Il est difficile de capter et d'enregistrer les longueurs d'onde ultraviolette et bleue à cause de l'absorption et de la diffusion dans l'atmosphère. Dans les couches supérieures de l'atmosphère, l'ozone absorbe la plus grande partie du rayonnement ultraviolet de moins que $0,25 \mu\text{m}$. Heureusement pour nous et pour la plupart des êtres vivants, puisque le rayonnement ultraviolet est dangereux. La diffusion de Rayleigh disperse les petites longueurs d'onde davantage que les ondes plus grandes. Ce type de diffusion implique que les rayonnements UV mesurant plus de $0,25 \mu\text{m}$ et les petites longueurs d'onde visibles (bleu) soient dispersés de façon beaucoup plus importante que les grandes longueurs d'onde. Seule une très petite partie de cette énergie peut donc atteindre la surface de la Terre et interagir avec elle. La lumière bleue est dispersée 4 fois plus que la lumière rouge, tandis que l'ultraviolet est dispersé 16 fois plus.

2. Les meilleures conditions pour la télédétection utilisant les longueurs d'onde visibles seraient lors d'une journée ensoleillée, sans nuage, sans pollution, et près de l'heure de midi. À midi, le Soleil est directement au-dessus de la cible, ce qui réduit la distance que le rayonnement doit franchir et minimise les effets de diffusion. Une journée sans nuage assure aussi une illumination uniforme et élimine les ombrages. Les conditions sèches et sans pollution minimisent la diffusion et l'absorption causées par les gouttelettes d'eau et les autres particules dans l'atmosphère.

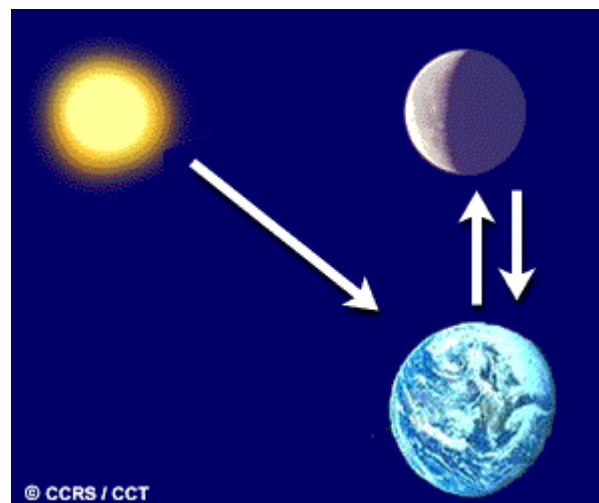


1.5 Question éclair



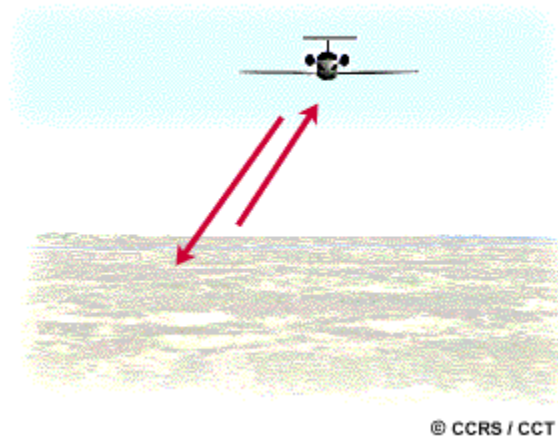
Par une nuit claire, quand la lune est en croissant, il est possible de voir le profil et même quelques détails de la partie ombragée de la lune. D'où la lumière qui éclaire la partie ombragée de la lune peut-elle bien venir?

1.5 Réponse



La lumière vient du soleil (bien sûr), elle frappe la Terre, rebondit sur le côté ombragé de la lune et revient jusqu'à vos yeux. Un long parcours, n'est-ce pas?

1.6 Question éclair

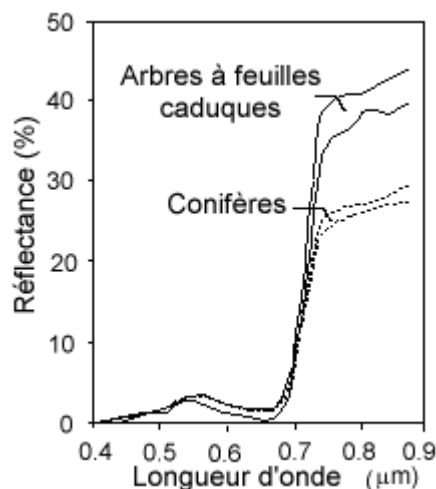


Existe-t-il un équivalent passif au capteur radar?

1.6 Réponse

Eh oui ! Les radiomètres à micro-ondes passives ne possèdent pas leur propre source d'illumination. Ces capteurs utilisent l'énergie des micro-ondes émises naturellement. Un tel instrument est très utile pour la détection, l'identification et la mesure des nappes d'hydrocarbures océaniques.

1.7 Questions éclaircs



1. Identifiez la meilleure façon de cartographier les espèces à feuilles caduques (bouleau, érable) et les conifères (pin, épinette, sapin) d'une forêt en été en utilisant des données de télédétection et expliquez pourquoi. Utilisez les courbes de réflexion qui démontrent les signatures spectrales de ces deux types d'arbres pour expliquer votre réponse.
2. Quel serait l'avantage d'afficher simplement des images de longueurs d'onde variées en combinaison pour faire une image couleur au lieu d'examiner chaque image individuellement.

1.7 Réponses

1. Parce que les deux types d'arbres présenteraient la même teinte de vert à l'oeil nu, une image (ou photographie) utilisant la portion visible du spectre ne serait pas utile. De plus, il serait difficile de distinguer les deux types de feuilles dans une photographie aérienne à partir de la forme ou de la taille des cimes, particulièrement si les arbres se trouvent dans une forêt mixte. En regardant les courbes de réflectance des deux types d'arbres, il est évident qu'il serait difficile de les distinguer à partir des longueurs d'onde visibles. Mais, dans le proche infrarouge, même si les deux reflètent une bonne portion du rayonnement incident, ils sont clairement identifiables. Donc, un dispositif de télédétection, tel qu'un film noir et blanc infrarouge, qui capte la réflexion infrarouge autour de 0,8 μm , serait idéal pour cette étude.
2. En combinant les images qui représentent différentes longueurs d'onde, nous pourrions identifier des combinaisons de réflectance entre les différentes bandes qui mettent au premier plan les objets que nous ne pourrions pas voir si nous les examinons une bande à la fois. De plus, ces combinaisons peuvent se manifester comme des variations subtiles de couleur (que nos yeux perçoivent plus facilement), au lieu de variations de teintes de gris si nous examinons seulement une image à la fois.

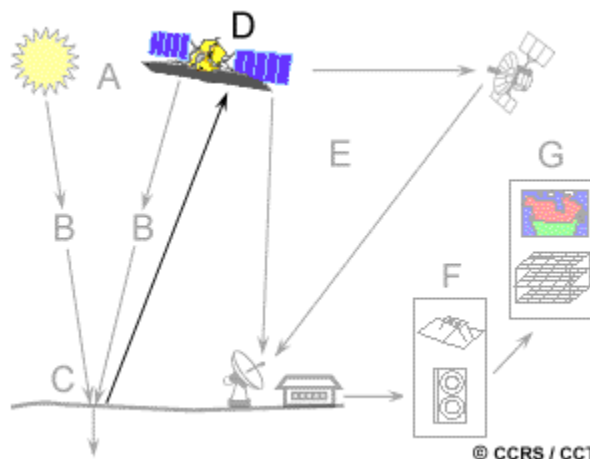


2. Plates-formes et capteurs

2.1 Sur Terre, dans l'air et dans l'espace

Au chapitre 1, nous avons pris connaissance de quelques concepts de base nécessaires à la compréhension des processus entourant la télédétection. Nous avons défini les trois principales composantes du processus de la télédétection : la source d'énergie, l'interaction entre l'énergie et l'atmosphère et l'interaction entre l'énergie et la surface. Lorsque nous avons discuté de la différence entre les capteurs passifs et les capteurs actifs ainsi que des caractéristiques des images, nous avons introduit brièvement une quatrième composante de la télédétection :

l'enregistrement de cette énergie par un capteur. Dans le présent chapitre, nous allons regarder de plus près cette dernière composante en examinant plus en détail les caractéristiques de la plate-forme de télédétection, des capteurs et des informations qui y sont enregistrées. Nous aborderons aussi rapidement la question du traitement des données.



Pour enregistrer adéquatement l'énergie réfléchie ou émise par une surface ou une cible donnée, on doit installer un capteur sur une **plate-forme** distante de la surface ou de la cible observée. Ces plates-formes peuvent être situées près de la surface terrestre, comme par exemple au sol, dans un avion ou un ballon ; ou à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, comme par exemple sur un véhicule spatial ou un satellite.



Les **capteurs au sol** sont souvent utilisés pour enregistrer des informations détaillées sur la surface. Ces informations sont, par la suite, comparées aux informations recueillies par avion ou à partir d'un satellite. Dans certains cas, on utilise les capteurs au sol pour mieux caractériser les cibles observées par d'autres capteurs, de manière à améliorer la compréhension de l'information de l'image. Les capteurs au sol sont souvent placés sur des échelles, des échafaudages, des édifices élevés, des grues, etc. Les plates-formes aéroportées sont principalement situées sur des **avions** à ailes fixes, quoique des hélicoptères soient parfois utilisés.

L'utilisation des avions est fréquente car cela facilite la cueillette de données ou d'images détaillées de la surface de la Terre, exactement à l'endroit et au moment voulus.

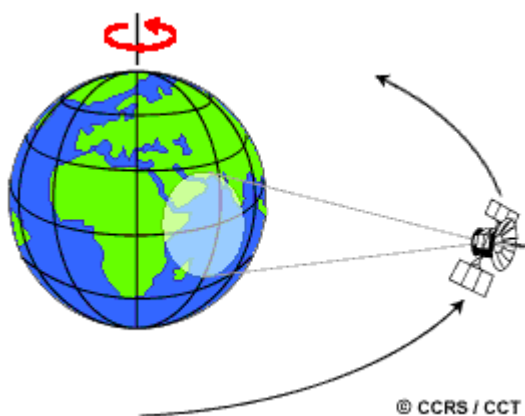


Dans l'espace, la télédétection est parfois effectuée à partir de la **navette spatiale** ou plus fréquemment, à partir de satellites. Les **satellites** sont des objets qui sont en orbite autour d'un autre objet, dans ce cas-ci, la Terre. Par exemple, la Lune est un satellite naturel de la Terre, par opposition aux satellites artificiels de la Terre que sont les plates-formes placées en orbite pour les besoins de la télédétection, des communications et de la télémétrie (positionnement et navigation). Grâce à leur orbite, les plates-formes spatiales permettent une couverture répétitive et continue de la surface de la Terre. Le coût est souvent un facteur déterminant dans le choix des différentes plates-formes.



2.2 Caractéristiques d'un satellite : l'orbite et sa fauchée

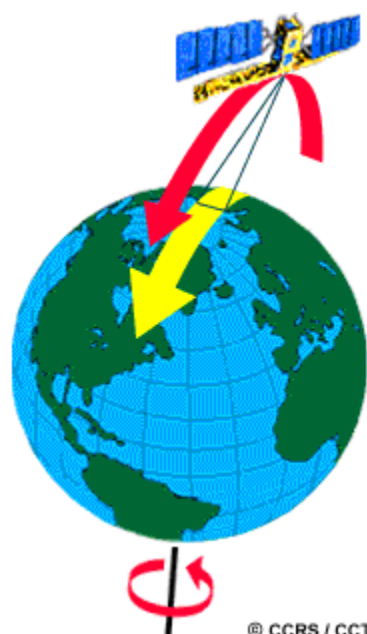
Dans la section précédente, nous avons vu que les capteurs peuvent être placés sur différentes plates-formes. Bien que les plates-formes terrestres ou aéroportées soient utilisées, ce sont les satellites qui fournissent la majeure partie des données recueillies par télédétection de nos jours. Certaines caractéristiques propres aux satellites en font des instruments particulièrement utiles pour l'acquisition d'information sur la surface de la Terre.



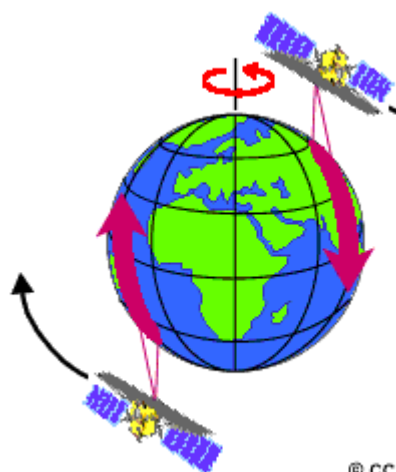
La trajectoire effectuée par un satellite autour de la Terre est appelée **orbite**. L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission. Le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre. Certains satellites ont une altitude très élevée et regardent toujours la même région de la surface de la Terre, ils ont une orbite **géostationnaire**. Ces satellites géostationnaires ont une altitude d'environ 36 000 kilomètres et se

déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la Terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques sont situés sur de telles orbites. L'altitude élevée de certains satellites météorologiques leur permet d'observer les nuages et les conditions qui couvrent un hémisphère complet de la Terre.

D'autres plates-formes spatiales suivent une orbite allant pratiquement du nord au sud ou vice versa. Cette configuration, combinée à la rotation de la Terre (ouest-est), fait qu'au cours d'une certaine période, les satellites ont observé la presque totalité de la surface de la Terre. Ce type d'orbite est appelé **orbite quasi polaire** à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la Terre. La plupart des satellites sur orbite quasi-polaires ont aussi une orbite **héliosynchrone**; de cette façon, ils observent toujours chaque région du globe à la **même heure locale solaire**. Pour une latitude donnée, la position du Soleil dans le ciel au moment où le satellite survole une certaine région au cours d'une saison donnée sera donc toujours la même. Cette caractéristique orbitale assure des conditions d'illumination solaire similaires, lorsqu'on recueille des données pour une saison particulière



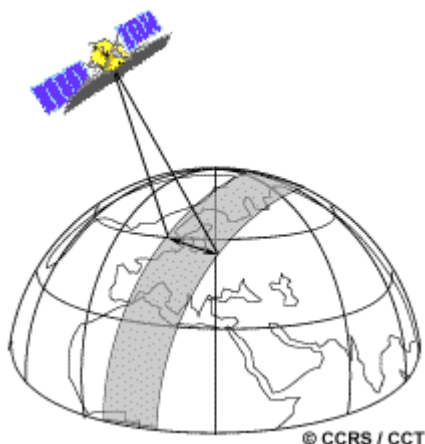
sur plusieurs années ou pour une région particulière sur plusieurs jours. Ceci est un facteur important lorsqu'on compare deux images successives ou lorsqu'on produit une mosaïque avec des images adjacentes, puisque les images n'ont pas à être corrigées pour tenir compte de l'illumination solaire.



© CCRS / CCT

De nos jours, la plupart des plates-formes satellitaires sont placées sur orbite quasi-polaire. Elles se déplacent donc vers le nord d'un côté de la Terre, et vers le sud dans l'autre moitié de leur orbite. Ces deux types de passage du satellite se nomment respectivement **orbite ascendante** et **orbite descendante**. Si l'orbite est aussi héliosynchrone, l'orbite ascendante du satellite se fait du côté ombragé de la Terre, tandis que l'orbite descendante se fait du côté éclairé par le Soleil. Les capteurs qui enregistrent l'énergie solaire réfléchi par la Terre ne recueillent donc de l'information qu'au cours leur orbite descendante, lorsque le Soleil illumine la Terre. Les capteurs actifs qui possèdent leur propre source

d'illumination ou les capteurs passifs qui enregistrent l'énergie émise par la planète (l'énergie infrarouge thermique par exemple) peuvent amasser des données autant lors des orbites ascendantes que descendantes de leurs satellites.

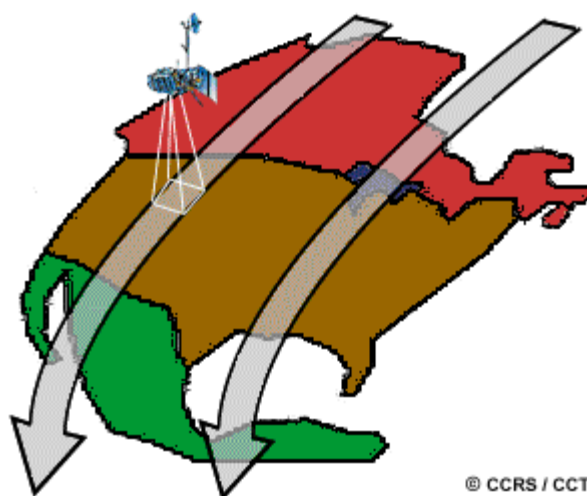


© CCRS / CCT

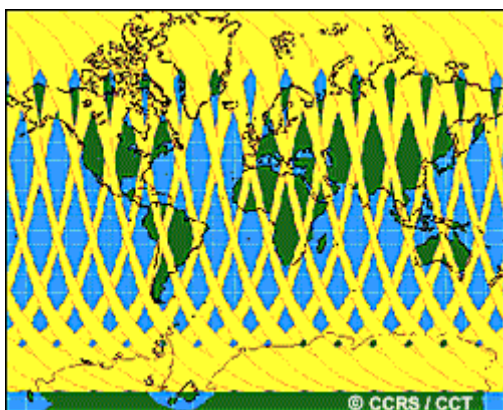
Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de **couloir-couvert** ou **fauchée**. Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et une centaine de kilomètres. Pour les satellites à orbite quasi-polaire, le satellite se déplace selon une trajectoire nord-sud. Cependant, vue de la Terre, la trajectoire du satellite semble avoir une composante vers l'ouest à cause de la rotation de la Terre. Ce mouvement apparent du satellite permet à la fauchée du capteur d'observer une **nouvelle région à chacun des passages consécutifs** du satellite.

L'orbite du satellite et la rotation de la Terre travaillent donc

de concert, permettant une couverture complète de la surface de la planète après un cycle orbital complet.

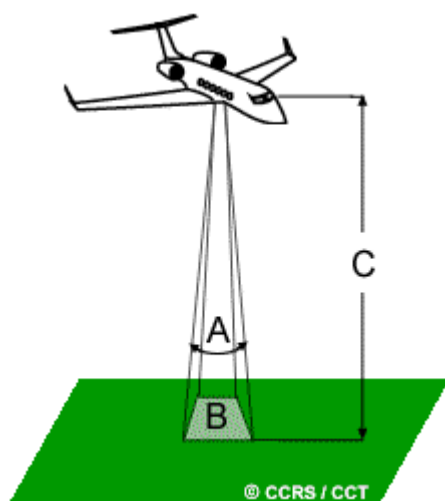


Les points sur la surface de la Terre qui se trouvent directement en dessous de la trajectoire du satellite sont appelés les points **nadir**. On définit le **cycle de passage** du satellite comme étant la période de temps nécessaire pour que le satellite revienne au-dessus d'un point nadir pris au hasard. Le satellite aura alors effectué un cycle orbital complet. La période de temps nécessaire pour compléter un cycle orbital complet varie d'un satellite à l'autre. La durée du cycle orbital ne doit pas être confondue avec la période de revisite. Avec les capteurs orientables, les instruments peuvent observer une surface avant et après les passages de l'orbite au-dessus de la cible, ce qui permet une période de revisite beaucoup plus courte que le cycle orbital. La période de passage au nadir est un facteur important pour plusieurs applications de la télédétection, spécialement lorsque des images fréquentes sont nécessaires (par exemple : pour surveiller la dispersion lors d'un déversement d'hydrocarbures ou pour mesurer l'ampleur d'une inondation). Les satellites à orbite quasi-polaire ont une couverture plus fréquente des régions de latitude élevée par rapport à la couverture des zones équatoriales. Cette plus grande couverture est due à l'élargissement, vers les pôles, de la zone de chevauchement entre deux fauchées adjacentes.



2.3 Résolution spatiale, espacement des pixels et échelle

Pour certains instruments de télédétection, la distance entre la cible observée et la plate-forme joue un rôle important puisqu'elle détermine la grandeur de la région observée et le détail qu'il sera possible d'obtenir. Un capteur placé sur une plate-forme éloignée de la cible pourra observer une plus grande région, mais ne sera pas en mesure de fournir beaucoup de détails. Par exemple, pensez à ce que voit un astronaute à bord de la navette spatiale lorsqu'il regarde la Terre par rapport à ce que vous pouvez observer à bord d'un avion. L'astronaute pourra voir une province entière d'un seul coup d'oeil mais ne pourra pas distinguer les maisons. Lors d'un vol en avion au-dessus d'une ville, il est possible de voir des édifices et des automobiles, mais la région observée est beaucoup plus petite que celle vue par l'astronaute. Il y a une différence semblable, quoique moins marquée, entre les images satellitaires et les photographies aériennes.



Le détail qu'il est possible de discerner sur une image dépend de la résolution spatiale du capteur utilisé. La résolution spatiale est fonction de la dimension du plus petit élément qu'il est possible de détecter. La résolution spatiale d'un capteur passif (nous regarderons plus loin le cas spécial des capteurs actifs) dépend principalement de son **champ de vision instantanée (CVI)**. Le CVI est défini comme étant le cône visible du capteur (A) et détermine l'aire de la surface "visible" à une altitude donnée et à un moment précis (B). La grandeur de cette aire est obtenue en multipliant le CVI par la distance de la surface au capteur (C). Cette aire est appelée la **superficie de résolution** ou **cellule de résolution** et constitue une étape critique pour la détermination de la

résolution spatiale maximale du capteur. Pour pouvoir différencier un élément de la surface observée, l'élément en question doit être de dimension égale ou supérieure à la cellule de résolution. Si l'élément est plus petit, il ne sera généralement pas différencié puisque c'est l'énergie moyenne des éléments de la cellule de résolution qui sera captée. Cependant, dans certaines conditions, un élément plus petit peut être détecté si sa réflectivité domine celle des autres éléments présents dans la cellule de résolution. On parle alors de détection plus fine que la résolution.

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 1, les images de télédétection sont composées d'une matrice d'éléments appelés **pixels**. Le pixel est le plus petit élément d'une image. Il est normalement carré et représente une partie de l'image. Il est cependant important de faire la distinction entre l'espacement des pixels et la résolution spatiale. Si un capteur a une résolution spatiale de 20 mètres et qu'il est possible de charger à l'écran une image provenant de ce capteur avec la pleine résolution, chaque pixel à l'écran représentera une superficie correspondant à 20 m sur 20 m au sol. Dans ce cas, la résolution et l'espacement des pixels sont identiques. Par contre, il est possible d'afficher la même image avec un espacement des

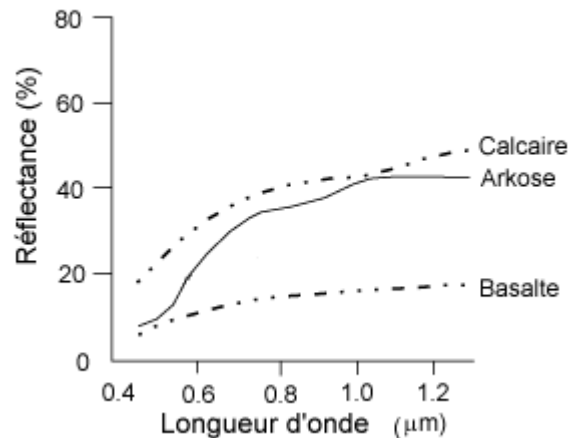
pixels qui soit différent de la résolution. Sur de nombreuses affiches montrant des images de la Terre prises à partir d'un satellite, on combine plusieurs pixels en les moyennant, mais ceci ne modifie en rien la résolution spatiale du capteur utilisé.



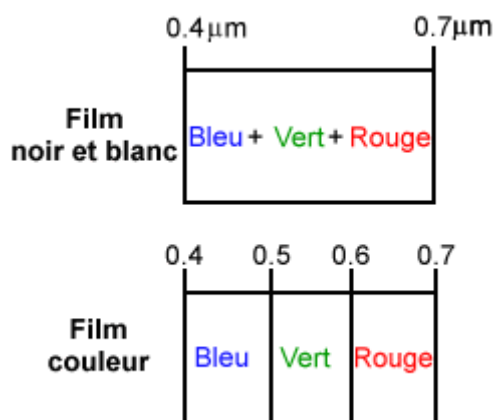
Les images sur lesquelles seuls les grands éléments sont visibles ont une **résolution "grossière" ou "basse"**. Les images à **résolution fine ou élevée** permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions. Les capteurs utilisés par les militaires par exemple, sont conçus pour obtenir le plus de détails possible. Ils ont donc une résolution très fine. Les satellites commerciaux ont une résolution qui varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres. De façon générale, plus la résolution augmente, plus la superficie de la surface visible par le capteur diminue.

Le rapport entre la distance que l'on mesure sur une image ou une carte, et la distance correspondante au sol est appelée échelle. Une carte ayant une échelle de 1:100 000 représente un objet au sol de 100 000 cm (1 km) par un objet de 1 cm. Les cartes pour lesquelles le rapport est petit (1:100 000) sont des cartes à petite échelle, tandis que les cartes pour lesquelles ce rapport est plus grand (1:5 000) sont des cartes à grande échelle.

2.4 Résolution spectrale



Au chapitre 1, nous avons abordé la **réponse spectrale** et les **courbes d'émissivité spectrale** qui caractérisent une cible ou une surface pour un ensemble de longueurs d'onde. Il est souvent possible de distinguer des classes de caractéristiques et de détails dans une image en comparant leurs réponses différentes sur un ensemble de longueurs d'onde. Comme nous l'avons vu à la section 1.5, des classes très larges, comme l'eau et la végétation, peuvent être séparées en utilisant un intervalle de longueurs d'onde assez grand (le visible et l'infrarouge par exemple). Des classes plus spécifiques comme par exemple **différents types de roche** ne sont pas aussi faciles à différencier et nécessitent l'utilisation d'un intervalle de longueurs d'onde beaucoup plus fin. Pour ce faire, nous devons utiliser un capteur ayant une **résolution spectrale** beaucoup plus grande. La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites.



Une pellicule noir et blanc utilisée dans un appareil photographique enregistre les longueurs d'onde sur presque toutes les longueurs d'onde situées dans le spectre visible. Sa **résolution**

spectrale est assez grossière, car les différentes longueurs d'onde ne sont pas différenciées par la pellicule qui n'enregistre que l'ensemble de l'énergie lumineuse captée par l'objectif. Une pellicule couleur est sensible elle aussi à l'ensemble des longueurs d'onde visibles, mais elle possède une résolution spectrale plus élevée puisqu'elle peut distinguer les longueurs d'onde dans le bleu, le vert et le rouge. Cette pellicule peut donc caractériser l'intensité lumineuse détectée selon ces intervalles de longueurs d'onde.

Plusieurs instruments de télédétection peuvent enregistrer l'énergie reçue selon des intervalles de longueurs d'onde à différentes résolutions spectrales. Ces instruments sont appelés **capteurs multispectraux** et seront décrits plus en détail dans les sections suivantes. Des capteurs multispectraux plus développés, appelés capteurs hyperspectraux, sont capables de détecter des centaines de bandes spectrales très fines dans la portion du spectre des ondes électromagnétiques réunissant le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen. La très grande résolution spectrale des capteurs hyperspectraux facilite la différenciation des caractéristiques d'une image basée sur la réponse différente dans chacune des bandes spectrales.

2.5 Résolution radiométrique

L'arrangement des pixels décrit les structures spatiales d'une image tandis que les caractéristiques radiométriques décrivent l'information contenue dans une image. Chaque fois qu'une image est captée par une pellicule ou un capteur, sa sensibilité à l'intensité de l'énergie électromagnétique détermine la résolution radiométrique. La **résolution radiométrique** d'un système de télédétection décrit sa capacité de reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible se nomme plage dynamique.

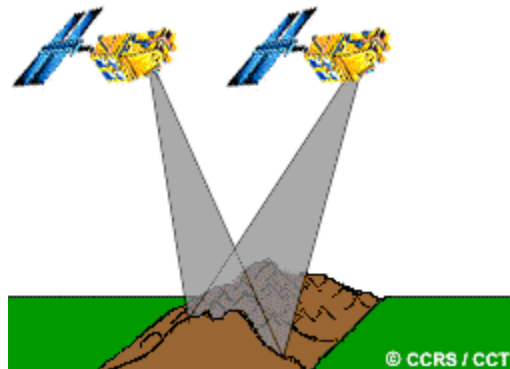


Les données images sont représentées par une valeur numérique variant entre 0 et 255 à une certaine puissance moins un. Cet intervalle correspond à un nombre de bits utilisés pour encoder des valeurs en format binaire. Chaque bit représente un exposant de la base 2 (par exemple, 1 bit = $2^1 = 2$). Le nombre maximum de niveaux d'intensité disponibles dépend du nombre de bits utilisés pour représenter l'intensité enregistrée. Par exemple, un capteur utilisant 8 bits pour enregistrer les données aura $2^8 = 256$ niveaux d'intensité disponibles car il aura 256 valeurs numériques disponibles allant de 0 à 255. Si seulement 4 bits sont utilisés, alors seulement $2^4 = 16$ valeurs allant de 0 à 15 seront disponibles. La résolution radiométrique sera donc plus faible. Les données enregistrées sont souvent affichées en tons de gris, avec le noir représentant une valeur numérique de "0" et le blanc représentant la valeur numérique maximale. En comparant une image de 2-bits à une image de 8-bits à une image de 8-bits d'une même scène, on peut voir l'énorme différence dans le nombre de détails qu'il est possible de distinguer selon la résolution radiométrique.

2.6 Résolution temporelle

En plus de la résolution spatiale, spectrale et radiométrique, l'autre concept important en télédétection est celui de la **résolution temporelle**. Nous avons déjà fait allusion à ce concept dans la section 2.2, quand il a été question de la période de passage au nadir d'un satellite, qui est le temps que prend un satellite pour effectuer un cycle orbital complet. Cette période est généralement de quelques jours. Il faut donc quelques jours à un tel satellite pour qu'il puisse observer de nouveau exactement la même scène à partir du même point dans l'espace. La résolution temporelle absolue du système de télédétection est donc égale à cette période. Toutefois, certaines régions de la surface peuvent être observées plus fréquemment puisqu'il y a chevauchement entre les couloirs-couverts adjacents et que ces zones de chevauchement deviennent de plus en plus grandes en s'approchant des pôles. Certains satellites ont aussi la possibilité de **pointer leurs capteurs en direction du même point** pour différents passages du satellite. La résolution temporelle effective du satellite dépend donc d'une variété de facteurs dont la grandeur de la zone de chevauchement entre les couloirs-couverts adjacents, la capacité du satellite et de ses capteurs et également la latitude.

L'un des grands avantages de la télédétection satellitaire est sa capacité à amasser périodiquement de l'information d'une même région de la Terre. Les caractéristiques spectrales de la région observée peuvent changer avec le temps. La comparaison d'images multitemporelles permet de détecter ces changements. Par exemple, durant la période de croissance de la végétation, de nombreuses espèces se transforment continuellement et notre capacité à détecter ces changements dépend de la fréquence avec laquelle les données sont recueillies. En amassant des données périodiquement et de façon continue, il est possible de suivre les changements qui surviennent à la surface de la Terre, qu'ils soient naturels (comme le développement de la végétation ou l'évolution d'une inondation) ou de source humaine (comme le développement des milieux urbains ou la déforestation).

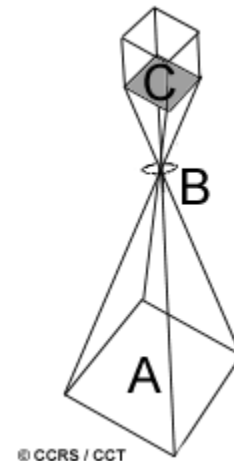


Le facteur temps est important en télédétection lorsque :

- la couverture nuageuse est persistante (par exemple sous les tropiques), ce qui limite les moments où il est possible d'observer la surface;
- l'on veut surveiller des phénomènes de courte durée (inondations, déversements d'hydrocarbures, etc.);
- l'on a besoin d'images multitemporelles (par exemple, pour étudier d'une année à l'autre, l'étendue d'une maladie s'attaquant aux forêts);
- les changements temporels dans l'apparence d'une caractéristique sont utilisés pour différencier celle-ci d'une autre caractéristique similaire (par exemple, pour faire la différence entre les cultures de blé et de maïs).

2.7 Les appareils photographiques et la photographie aérienne

Les appareils photographiques et les photographies aériennes constituent le système de télédétection le plus simple et le plus ancien utilisé pour observer la surface de la Terre. Les appareils photographiques sont des systèmes qui enregistrent un cliché presque instantané d'une **région (A)** de la surface. Ces appareils sont des capteurs optiques passifs qui utilisent une **lentille (B)** (ou un système de lentilles que l'on appelle système optique) afin de former une image sur le **plan focal (C)**, plan sur lequel l'image est bien définie.



La pellicule photographique est sensible à la lumière (énergie) d'une longueur d'onde de 0,3 à 0,9 microns, couvrant l'ultraviolet (UV), le visible et le proche infrarouge (PIR). Les pellicules **panchromatiques** sont sensibles aux ondes dans l'ultraviolet et dans le visible. Ces pellicules produisent des photographies noir et blanc et sont les plus utilisées en photographie aérienne. La photographie des ultraviolets utilise aussi ce type de pellicule, mais un filtre est utilisé avec l'appareil photographique afin d'absorber la lumière visible. Ceci permet d'enregistrer les cibles qui réfléchissent les ultraviolets. Cependant, cette technique n'est pas utilisée très souvent car l'atmosphère diffuse et absorbe beaucoup d'énergie dans ces longueurs d'onde. La photographie noir et blanc des longueurs d'onde de l'infrarouge utilise une pellicule sensible dans cette bande et permet de détecter des différences dans le couvert végétal.



La photographie couleur et pseudo-couleur (ou couleur infrarouge (CIR)) nécessite l'utilisation de trois niveaux de sensibilité dans la pellicule, chaque niveau étant sensible à trois bandes de

longueurs d'onde. Pour une photographie couleur normale les niveaux sont sensibles à la lumière bleue, verte et rouge, comme notre œil. Ces photos nous apparaissent de la même façon que notre œil perçoit l'environnement et les couleurs nous apparaissent normales (ex. : les feuilles sont vertes). Pour les photographies couleur infrarouge, les trois niveaux de sensibilité enregistrent le vert, le rouge et une portion du proche infrarouge qui sont ensuite traités pour apparaître bleu, vert et rouge respectivement. Pour les photographies pseudo-

couleur, les cibles ayant une forte réflectivité dans le proche infrarouge apparaissent rouges, celles qui ont une forte réflectivité dans le rouge apparaissent vertes et celles avec une forte réflectivité dans le vert apparaissent bleues.



Les appareils photographiques peuvent être installés sur plusieurs types de plates-formes (terrestre, aérienne ou spatiale). Des photographies très détaillées sont prises à partir d'avions et sont utilisées là où l'identification de petits détails est nécessaire. La superficie couverte par une photo dépend de différents facteurs dont la distance focale de la lentille, l'altitude de la plate-forme et la dimension de la pellicule. La distance focale

contrôle le champ de vision angulaire de la lentille (concept similaire au champ de vision instantané introduit à la section 2.3) et détermine la superficie « vue » par l'appareil photographique. La distance focale typique pour ces appareils est de 152 mm, mais on utilise aussi des lentilles de distance focale de 90 mm et 210 mm. Plus la distance focale est grande, plus la superficie couverte au sol est petite mais plus il y a de détails (c.-à-d. une échelle plus grande). La superficie couverte dépend aussi de l'altitude de la plate-forme. En haute altitude, l'appareil photographique « verra » une plus grande surface au sol mais il y aura moins de détails (c.-à-d. une échelle plus petite). Les photos aériennes peuvent avoir une résolution spatiale de moins de 50 cm. La résolution spatiale d'une photographie aérienne est une fonction complexe qui dépend de plusieurs facteurs qui changent pour chaque image.

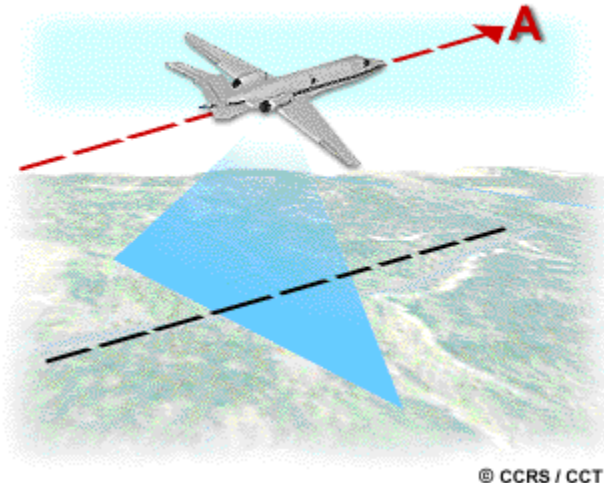
Les **photographies verticales** prises avec un appareil photographique à lentille unique sont les photos aériennes les plus communes en télédétection et en cartographie. Ces appareils photographiques sont spécialement faits pour exécuter rapidement une série de clichés, en limitant la distorsion géométrique. Ils sont souvent reliés à un système de navigation à bord de l'avion, ce qui permet une identification précise des coordonnées géographiques qui sont automatiquement assignées à chaque photographie. La plupart de ces systèmes ont aussi un mécanisme qui compense pour l'effet du déplacement de l'avion par rapport au sol, de façon à limiter, encore une fois, toutes distorsions dans l'image.

Afin d'obtenir des photographies aériennes verticales, l'avion survole la surface terrestre le long de lignes appelées lignes de vol. Les photos sont prises rapidement, l'appareil photographique étant pointé directement vers le sol. Deux photos successives ont un pourcentage de chevauchement de 50% à 60% (A). Ce chevauchement entre les images assure une couverture totale de la superficie le long de la ligne de vol et facilite le **visualisation stéréoscopique** des photographies. Grâce au chevauchement, les photos montrant la même région mais prises d'une perspective différente, sont jumelées et visionnées à l'aide d'un dispositif appelé le stéréoscope. Ce dispositif permet d'avoir une vue en trois dimensions de la région appelée un **modèle stéréo**. Cette méthode de visualisation

est très utilisée.

Les photographies aériennes s'avèrent très utiles lorsque la résolution spatiale est beaucoup plus importante que la résolution spectrale. La résolution spectrale de ces systèmes est généralement très grossière si l'on compare avec un système de capteurs électroniques. La géométrie utilisée dans les photos aériennes verticales est très connue. Il est donc possible de faire des mesures précises à partir de ces photos. Ces mesures sont utilisées en géologie, en foresterie, en cartographie et dans bien d'autres domaines. La photogrammétrie est la

science qui s'intéresse aux mesures faites sur les photographies aériennes et est connue depuis le début de l'utilisation de ces photos. Ces photos sont, dans la plupart des cas, analysées par des humains qui les regardent en stéréoscopie. Elles peuvent aussi être numérisées afin d'être analysées par un ordinateur. Au chapitre 4, nous discuterons plus en détail les différentes méthodes, manuelles ou par ordinateur, qui sont utilisées pour interpréter les images provenant de systèmes de télédétection.



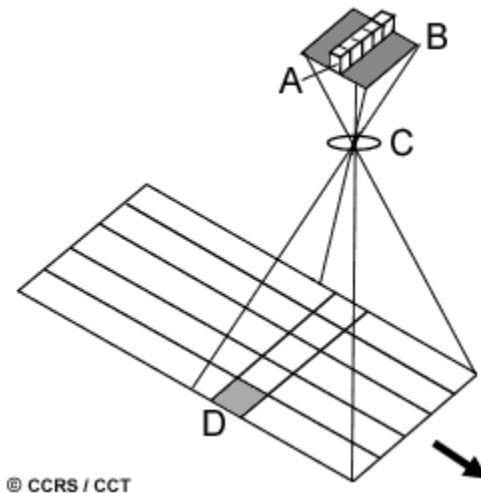
© CCRS / CCT

On obtient les photographies multibandes à l'aide de systèmes à plusieurs lentilles utilisant une combinaison de filtres afin de prendre simultanément des photos dans plusieurs bandes spectrales. Ce type d'appareil photographique a l'avantage de pouvoir enregistrer l'énergie réfléchi par la surface ou la cible dans plusieurs fenêtres spectrales, ce qui permet éventuellement de différencier et d'identifier plusieurs caractéristiques de cette surface ou de cette cible. Toutefois, l'analyse simultanée de ces photographies multiples peut devenir problématique. Les **appareils photographiques** numériques qui enregistrent l'énergie électromagnétique de façon électronique sont très différents des appareils photographiques utilisant une pellicule. Dans ces appareils numériques, la pellicule est remplacée par une grille de CCD (charge coupled devices, ou en français : dispositifs de couple de charges). Les CCD réagissent individuellement à la radiation électromagnétique les atteignant et produisent une charge électronique proportionnelle à l'intensité de l'énergie provenant de la surface. Une valeur numérique correspondante est ensuite assignée à chaque pixel pour chacune des bandes spectrales utilisées. Le format numérique de ces images peut être traité et stocké sur ordinateur ou utilisé pour produire une image sur papier photographique. Ces appareils photographiques permettent un meilleur contrôle de la résolution spectrale et une efficacité accrue lors de l'acquisition des données et lors de la consultation des données archivées. Les appareils photographiques numériques ont une résolution spatiale d'environ 0,3 m et une résolution spectrale allant de 0,012 nm à 0,3 nm. La dimension de la grille de CCD varie généralement entre 512 sur 512 et 2048 sur 2048.

Contrairement aux capteurs photographiques, plusieurs capteurs électroniques acquièrent leurs données en utilisant un **système à balayage**. Ce système utilise un capteur dont le champ de vision instantanée (CVI) est étroit, mais qui balaie la surface de façon à en produire une image bidimensionnelle de la surface. Les systèmes à balayage peuvent être utilisés sur des plates-formes aériennes ou spatiales, et opèrent essentiellement de la même façon. Un système à balayage qui utilise plusieurs longueurs d'onde pour acquérir les données est appelé un **balayeur multispectral** (BMS). Ce dernier système est le plus commun. Il y a deux méthodes principales (ou modes) de balayage pour amasser des données multispectrales : le **balayage perpendiculaire à la trajectoire** et le **balayage parallèle à la trajectoire**.

Centre canadien de télédétection

Le balayage parallèle à la trajectoire utilise aussi le mouvement de la plate-forme afin d'enregistrer les données le long de lignes successives et de construire une image bidimensionnelle. Le miroir est cependant remplacé par un **ensemble de détecteurs alignés (A)** et situé sur le **plan focal de l'image (B)** formée par un **système de lentilles (C)**. Ces détecteurs sont "poussés" le long de la trajectoire de la plate-forme. Ces systèmes sont parfois appelés **balayeur à barrettes**. Les détecteurs individuels mesurent l'énergie pour une **cellule de résolution au sol (D)**. Le CVI détermine donc la résolution spatiale du système. Un ensemble distinct de détecteurs est nécessaire pour chacune des bandes spectrales. L'énergie est détectée électroniquement par chacun des détecteurs de chacun des ensembles linéaires de détecteurs. Les données sont ensuite enregistrées numériquement.



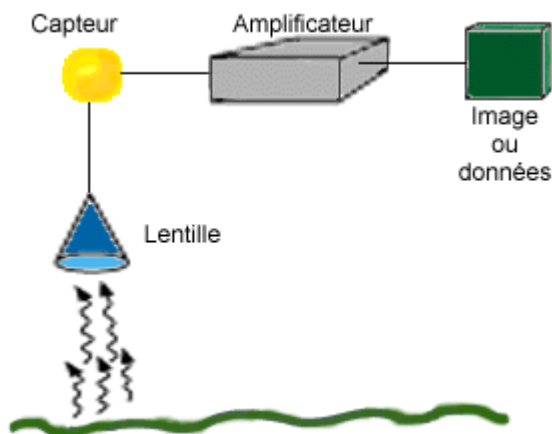
Le balayage parallèle à la trajectoire, qui utilise des ensembles linéaires de détecteurs, présente plusieurs avantages par rapport au balayage perpendiculaire à la trajectoire, qui utilise un miroir. L'ensemble de détecteurs, combiné au mouvement de balayage, permet d'avoir un temps de résidence plus long pour chacune des cellules de résolution au sol. Ceci permet aux détecteurs de capter plus d'énergie provenant de chaque cellule de résolution, ce qui améliore la résolution radiométrique. Le temps de résidence accru permet d'avoir un CVI plus petit, ainsi que de plus petites bandes spectrales. Ces systèmes ont donc des résolutions spatiale et spectrale plus fines, sans pour autant réduire la résolution radiométrique. De plus, comme les détecteurs sont des dispositifs micro-électroniques, ils sont généralement plus petits, plus légers, nécessitent moins d'énergie, sont plus fiables et plus durables car ils n'ont pas de pièces mobiles. En contrepartie, le calibrage de milliers de détecteurs dans le but d'obtenir une sensibilité uniforme pour l'ensemble du système est une tâche nécessaire mais compliquée.

Peu importe le système de balayage utilisé, ces systèmes possèdent des avantages marqués sur les systèmes photographiques. Les systèmes photographiques sont limités à l'utilisation de bandes spectrales dans le visible et dans la proche infrarouge, tandis que les BMS peuvent aussi utiliser l'infrarouge. Les BMS ont aussi une résolution spectrale supérieure aux systèmes photographiques. Les systèmes photographiques multispectraux utilisent des lentilles distinctes pour détecter chacune des bandes spectrales. Il est donc difficile de s'assurer que les résolutions spatiale et radiométrique de chacune des bandes sont semblables et qu'elles demeurent inchangées entre deux images. Les BMS détectent toutes les bandes simultanément en utilisant le même système optique, ce qui permet de contourner

ces problèmes potentiels. Les systèmes photographiques enregistrent l'énergie détectée au moyen de processus photochimiques pour lesquels il est plus difficile de faire des mesures et de contrôler la fiabilité. Comme les données provenant des BMS sont enregistrées électroniquement, il est plus facile de déterminer la quantité d'énergie détectée et d'augmenter la résolution radiométrique. Pour les systèmes photographiques, il est nécessaire de fournir continuellement de la pellicule à l'appareil, et de faire le développement de cette pellicule une fois au sol. Les BMS facilitent la transmission des données vers une station de réception sur la Terre, et le traitement immédiat de ces données par un ordinateur.

2.9 Télédétection dans l'infrarouge thermique

Plusieurs systèmes de télédétection multispectraux (SMS) captent la radiation infrarouge (ou thermique) ainsi que le visible et l'infrarouge réfléchi. Cependant, la détection de l'énergie infrarouge émise par la Terre (entre 3 et 15 microns) demande une technique différente de la technique utilisée pour capter l'énergie infrarouge réfléchi. Les capteurs infrarouge thermique (ou capteurs thermiques) utilisent des photodétecteurs dont la surface est sensible au contact des photons infrarouges émis par la Terre. Ces détecteurs sont refroidis à des **températures** très basses (près du zéro absolu), de façon à limiter leur propre émission d'infrarouge thermique. Les capteurs thermiques mesurent essentiellement la température de surface et les propriétés thermiques de la cible.



Les **systèmes de détection thermique** sont des capteurs à balayage perpendiculaire à la trajectoire, comme ceux décrits à la section précédente, qui captent la radiation émise dans la portion infrarouge thermique du spectre d'énergie. Ces systèmes utilisent une ou plusieurs références internes de température pour étalonner la radiation détectée. De cette façon, les capteurs thermiques peuvent déterminer la température absolue de la radiation captée. Les données sont généralement enregistrées sur pellicules photographiques ou sur

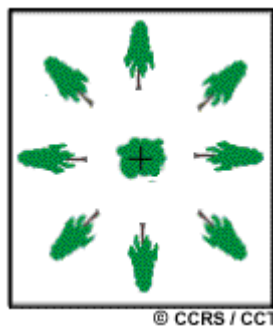
rubans magnétiques. La résolution en température des capteurs les plus communs peut atteindre 0,1°C. Afin d'analyser une image de température radiative relative (**un thermogramme**), on affiche en différents niveaux de gris, les températures chaudes en tons pâles, et les températures froides en tons foncés. Les images qui montrent les différences de température relative pour chacun des pixels sont suffisantes pour la plupart des besoins. La température absolue peut être calculée, mais demande un étalonnage précis, une mesure de température de référence et une connaissance approfondie des propriétés thermiques des cibles, de la distorsion géométrique et des effets radiométriques.

Les longueurs d'onde de la radiation infrarouge thermique sont relativement Grandes par rapport aux les longueurs d'onde de la partie visible du spectre. Les effets de la diffusion atmosphérique sont donc minimaux. Cependant, l'absorption de cette radiation par les gaz atmosphériques restreint normalement la détection utilisant ces longueurs d'onde à deux régions : la première de 3 à 5 microns, et la deuxième de 8 à 14 microns. Les capteurs d'infrarouge thermique ont généralement un CVI large afin de permettre à une quantité d'énergie suffisante d'atteindre le capteur. Cette précaution est nécessaire car la quantité d'énergie décroît avec l'augmentation de la longueur d'onde. La résolution spatiale des capteurs d'infrarouge est habituellement assez grossière comparativement à la résolution spatiale qu'il est possible d'atteindre dans le visible et l'infrarouge réfléchi. Les images provenant d'un capteur thermique sont prises durant le jour ou la nuit (parce que la radiation est émise et non réfléchie) et sont utilisées dans plusieurs domaines comme la reconnaissance militaire, la gestion des désastres (détection des feux de forêts) et la détection de fuites de chaleur.

2.10 Distorsion géométrique des images

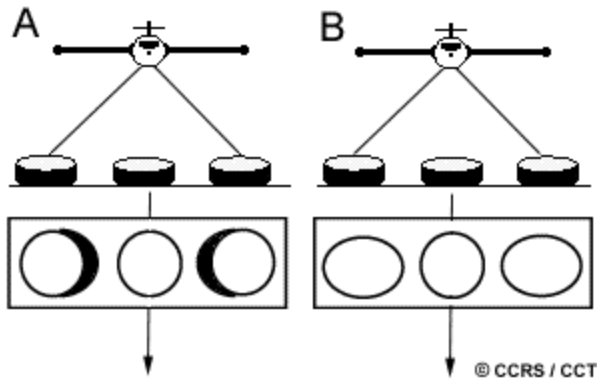
Plusieurs formes de distorsion géométrique sont possibles. Toutes les images obtenues par télédétection affichent, au départ, une ou plusieurs formes de **distorsion géométrique**, peu importe quelles aient été obtenues à partir d'un balayeur multispectral à bord d'un satellite, d'un système photographique à bord d'un avion ou à partir de toute autre plate-forme. Ce problème est inhérent à la télédétection puisque celle-ci tente généralement de représenter des données prises à la surface de la Terre (en trois dimensions) sur une image bidimensionnelle. Les formes de distorsion géométrique dont peut souffrir une image dépendent de la façon dont les données ont été acquises. Voici une liste de quelques facteurs pouvant influencer la distorsion géométrique :

- l'effet de perspective de l'optique du capteur
- le mouvement du système de balayage
- le mouvement et la stabilité de la plate-forme
- l'altitude, la vitesse et le comportement de la plate-forme
- le relief à la surface
- la courbure de la Terre et sa rotation.



Les systèmes à découpage, comme les appareils photographiques, fournissent une image instantanée de la portion de la surface se trouvant directement sous l'appareil. La principale distorsion pour les photos aériennes verticales prend la forme d'un déplacement du relief. Pour les objets directement sous le centre de la lentille (c.-à-d. au point nadir), seul le sommet de l'objet sera visible, alors que pour tous les autres objets dans la photo, un côté est visible en plus du sommet, ce qui donne l'impression que ces objets s'allongent vers les bords de l'image. Plus l'objet est haut ou plus il est loin du centre, plus la distorsion est grande et plus la position de l'objet est erronée.

La géométrie des systèmes à balayage parallèle à la trajectoire est semblable à celle des systèmes de photographie aérienne puisque, pour chaque ligne balayée, chaque détecteur prend une image instantanée de chacune des cellules de résolution au sol. Certaines variations géométriques entre les lignes balayées peuvent être causées par les variations dans l'altitude et le comportement de la plate-forme le long de sa trajectoire.



Les images provenant d'un système à balayage perpendiculaire à la trajectoire sont sujettes à deux types de distorsions géométriques. Premièrement, elles sont sujettes aux déplacements du relief (A) de la même façon que les photos aériennes, mais seulement dans la direction parallèle à celle du balayage. Ce type de distorsion n'est pas présent au nadir, mais au fur et à mesure que le balayage s'effectue perpendiculairement à la trajectoire, le sommet et le côté des objets détectés semblent s'allonger en s'éloignant du point nadir pour chaque ligne de balayage. L'autre type de distorsion de ces images (B) est causé par la rotation du système de balayage. Au cours du balayage, la distance entre le capteur et la surface augmente de plus en plus en s'éloignant du centre du couloir-couvert. Même si le miroir permettant le balayage tourne à une vitesse constante, le CVI du capteur se déplace plus rapidement par rapport à la surface et capte une région plus grande lorsqu'il se déplace près des bords de l'image. Cet effet produit une compression des caractéristiques de l'image pour les points éloignés du nadir et s'appelle **distorsion tangentielle d'échelle**.

Toutes les images sont sujettes aux distorsions géométriques causées par les variations dans la stabilité de la plate-forme pendant la prise des données, incluant des variations de vitesse, d'altitude, de comportement (l'orientation angulaire par rapport au sol). Ces effets sont plus prononcés lorsque les données proviennent de plates-formes aériennes que lorsqu'elles proviennent de plates-formes spatiales, puisque la trajectoire des plates-formes spatiales est relativement stable, particulièrement en ce qui a trait à leur altitude. Cependant, la rotation d'est en ouest de la Terre durant l'orbite du capteur à balayage cause, à chaque balayage, un léger déplacement vers l'ouest de la zone observée. L'image qui en résulte présente une forme de distorsion appelée **distorsion oblique**. Ce type de distorsion est typique lorsque les images proviennent d'un capteur multispectral monté sur un satellite.

Les causes de distorsions géométriques et des erreurs de positionnement changent d'une situation à l'autre, mais ces distorsions sont inhérentes aux images obtenues par télédétection. Dans la plupart des cas, il est possible d'enlever ou du moins, de réduire les erreurs engendrées par la distorsion, mais ces erreurs doivent toujours être prises en considération avant d'extraire toute information de ces images.

Nous en savons maintenant un peu plus sur les caractéristiques des plates-formes et des capteurs. La prochaine section présente certains capteurs spécifiques, principalement sur plate-forme spatiale, qui utilisent la radiation visible et l'infrarouge.

2.11 Satellites et capteurs météorologiques



La prédiction et la surveillance de la météo a été l'une des premières applications civiles (ou non-militaires) de la télédétection. Le premier satellite météorologique fut TIROS-1 (Television and Infrared Observation Satellite), qui a été lancé en 1960 par les États-Unis. Plusieurs autres satellites météorologiques ont été lancés dans les cinq années suivantes. Ces satellites avaient tous des orbites polaires héliosynchrones, ce qui permettait une couverture répétitive des systèmes météorologiques mondiaux. En 1966, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) des États-Unis a lancé le satellite géostationnaire Applications Technology Satellite (ATS-1) qui fournissait des **images hémisphériques** de la

surface de la Terre et de la couverture de nuages à toutes les 30 minutes. Pour la première fois, le développement et le mouvement des systèmes météorologiques pouvaient être surveillés de façon continue. Aujourd'hui, plusieurs pays exploitent des satellites météorologiques pour surveiller les conditions climatiques autour du globe. Généralement, ces satellites utilisent des capteurs à résolution spatiale grossière (en comparaison aux systèmes pour l'observation de la Terre) et couvrent de grandes surface du globe. Leur résolution temporelle, généralement élevée, fournit des observations fréquentes de la surface de la Terre, de l'humidité atmosphérique et de la couverture de nuages, ce qui permet de surveiller et de prédire les conditions climatiques de l'ensemble du globe. Nous allons maintenant décrire quelques satellites/capteurs utilisés en météorologie.

GOES



Le système GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) est le successeur de la série ATS. Les satellites GOES ont été conçus par la NASA pour NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pour fournir au United States National Weather Service des images fréquentes et à petite échelle de la surface de la Terre et de la couverture de nuages. Depuis plus de 20 ans, la série GOES a surtout été utilisée par les météorologues pour la surveillance et la prédiction de la météo. Ces satellites font partie d'un réseau

mondial de satellites météorologiques qui sont alignés à des intervalles de 70° de longitude autour de la Terre pour offrir une couverture presque totale du globe. Deux satellites GOES, placés en orbite géostationnaire à 36 000 km au-dessus de l'équateur, voient chacun un tiers de la Terre. Le premier satellite est situé à 75°O de longitude et surveille l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud, et la plus grande partie de l'océan Atlantique. Le deuxième est situé à

135°O de longitude et surveille l'Amérique du Nord et le bassin de l'océan Pacifique. À eux deux, ils couvrent la région s'étendant du 20e° O au 165e ° E de longitude. Cette image GOES couvre une portion du sud-est des États-Unis, et les régions océaniques adjacentes où plusieurs tempêtes importantes se développent. Cette image montre l'ouragan Fran qui s'approche du sud-est des États-Unis et des Îles Bahamas, en septembre 1996.

Deux générations de satellites GOES ont été lancés pour mesurer les rayonnements émis et réfléchis, desquels nous pouvons dériver les températures atmosphériques, les vents, l'humidité et la couverture de nuages. La première génération de satellites GOES s'étend de 1975 (avec GOES-1) à 1992 (avec GOES-7). La conception des satellites GOES-1 à GOES-7 ne leur permettait d'imager la Terre qu'environ 5% du temps. Avec GOES-8 (lancé en 1994) on a procédé à plusieurs améliorations techniques. Ces satellites peuvent observer la Terre de façon presque continue, ce qui permet de prendre plus d'images (à toutes les quinze minutes). Cette augmentation en résolution temporelle, jumelée aux améliorations de la résolution spatiale et radiométrique des capteurs, procure une information pertinente et des données de meilleure qualité pour la prédiction des conditions météorologiques.

GOES-8 et les autres satellites de la deuxième génération sont équipés d'instruments d'imagerie et de sondage séparés. L'imageur possède cinq bandes qui captent le rayonnement visible et infrarouge du Soleil. Les bandes infrarouges permettent aux satellites de capter des images le jour et la nuit. Le dépointage latéral des capteurs et la possibilité de choix de bandes permettent d'acquérir des images d'un hémisphère complet, ou encore, des images à petite échelle d'une région choisie. Cette dernière possibilité permet aux météorologues de surveiller des régions problématiques spécifiques pour améliorer les prévisions à court terme. Les données images possèdent une résolution radiométrique de 10 octets et peuvent être transmises directement aux écrans des utilisateurs sur Terre. Le tableau suivant décrit les bandes individuelles, leurs résolutions spatiales et leurs applications à la météorologie.

Bandes de GOES

Bande	Domaine spectral (microns)	Résolution spatiale	Application
1	0,52 - 0,72 (visible)	1 km	Nuages, pollution, identification de tempêtes sévères
2	3,78 - 4,03 (proche IR)	4 km	Identification de la brume durant la nuit, différenciation des nuages de pluie et de neige ou glace durant le jour; détection de feux et d'éruptions volcaniques, détermination de la température de la surface des océans durant la nuit
3	6,47 - 7,02 (vapeur d'eau au niveau supérieur)	4 km	évaluation de l'advection et du contenu en humidité des couches atmosphériques intermédiaires. Suivi du mouvement des masses atmosphériques intermédiaires. Suivi du mouvement des masses atmosphériques
4	10,2 - 11,2 (IR à longue longueur d'onde)	4 km	identification des vents qui entraînent les nuages, les tempêtes sévères, la pluie torrentielle
5	11,5 - 12,5 (fenêtre de l'IR qui est sensible à la vapeur d'eau)	4 km	identification de l'humidité dans la couche inférieure de l'atmosphère, détermination de la température de la surface des océans, détection de poussière et de cendre volcanique dans l'atmosphère

Le sondeur atmosphérique à 19 canaux mesure le rayonnement émis dans 18 bandes infrarouges thermiques et le rayonnement réfléchi dans une bande visible. Ces données possèdent une résolution spatiale de 8 km et une résolution radiométrique de 13 octets. Les données du sondeur sont utilisées pour mesurer la température de la surface terrestre et des nuages, pour créer des profils des taux d'humidité atmosphérique, et pour analyser la distribution de l'ozone dans l'atmosphère.

NOAA AVHRR

La NOAA opère aussi une autre série de satellites utiles pour la météorologie et pour d'autres applications. Ces satellites, en orbite polaire héliosynchrone (830 à 870 km au-dessus de la Terre), font partie de la série Advanced TIROS (datant du début des années 1960). Ils complètent l'information fournie par les satellites géostationnaires (comme GOES). Les deux satellites, dont chacun produit une couverture totale de la Terre, travaillent conjointement pour assurer que les données de toutes les régions de la Terre soient mises à jour au moins à toutes les six heures. Un satellite croise l'équateur du nord au sud, tôt le matin, et l'autre le

croise dans l'après-midi.

À bord des satellites NOAA se trouve le capteur primaire AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Celui-ci est utilisé pour la météorologie et pour l'observation à petite échelle de la surface de la Terre. Le capteur AVHRR capte le rayonnement électromagnétique du visible, proche IR, du moyen IR et de l'IR thermique. La fauchée au sol mesure 3000 km. Le tableau suivant décrit les bandes AVHRR, leurs longueurs d'onde, leurs résolutions spatiales (au nadir) et leurs applications générales.

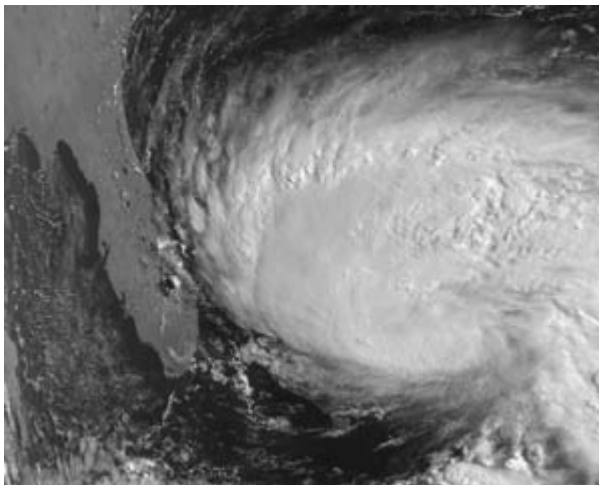
Bandes de NOAA AVHRR

Bande	Domaine spectral (µm)	Résolution spatiale	Application
1	0,58 - 0,68 (rouge)	1,1 km	surveillance des nuages, de la neige et de la glace
2	0,725 - 1,1 (proche IR)	1,1 km	surveillance de l'eau, de la végétation, et de l'agricole
3	3,55 - 3,93(IR moyen)	1,1 km	température de la surface des océans, volcans, feux de forêts
4	10,3 - 11,3(IR thermique)	1,1 km	température de la surface des océans, humidité du sol
5	11,5 - 12,5 (IR thermique)	,1 km	température de la surface des océans, humidité du sol

Les données du capteur AVHRR peuvent être achetées et formatées en quatre modes opérationnels qui se distinguent par leurs résolutions et leurs modes de transmission. Les données peuvent être retransmises directement au sol et visionnées tout de suite après qu'elles aient été captées, ou elles peuvent être enregistrées à bord du satellite pour être retransmises et traitées plus tard. Le tableau suivant décrit les différents formats de données et leurs caractéristiques.

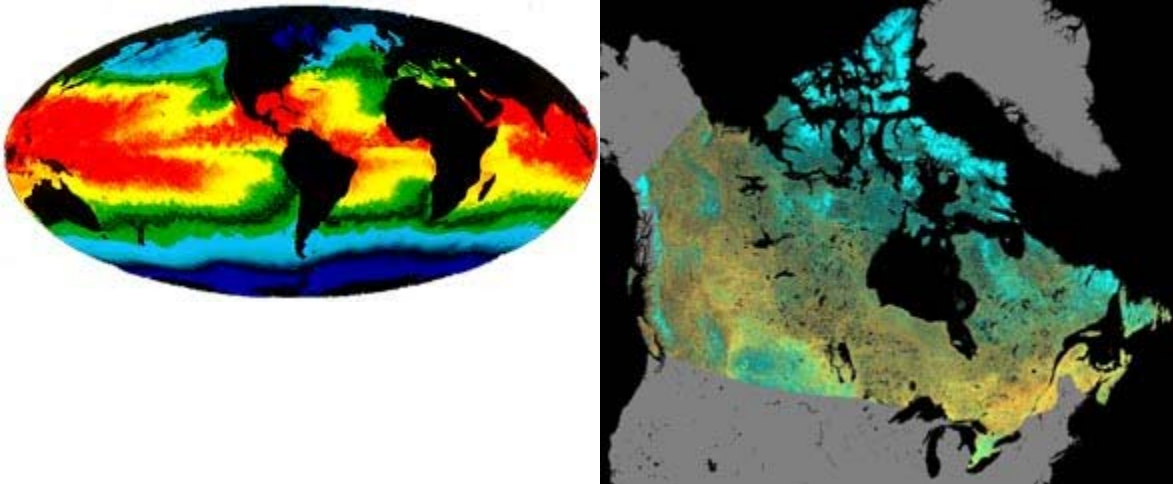
Formats des données AVHRR

Format	Résolution spatiale	Transmission et traitement
APT (Automatic Picture Transmission)	4 km	transmission directe et affichage à faible résolution
HRPT (High Resolution Picture Transmission)	1,1 km	transmission directe et affichage à pleine résolution
GAC (Global Area Coverage)	4 km	image à faible résolution de données enregistrées
LAC (Local Area Coverage)	1,1 km	données choisies à pleine résolution d'une région locale provenant de données enregistrées



Bien que les données AVHRR soient utilisées fréquemment pour la prévision et l'analyse des images des systèmes météorologiques, le capteur est également bien adapté à l'observation et la surveillance de la Terre. AVHRR possède une résolution spatiale plus grossière que d'autres capteurs de télédétection (décrits dans la prochaine section), il est surtout utilisé pour la surveillance des phénomènes régionaux de petite échelle, telle que la cartographie de la température de la surface des océans, et de la santé de la végétation naturelle et agricole. L'on peut créer des mosaïques couvrant une grande superficie à partir de plusieurs séries

de données AVHRR, ce qui permet l'analyse et la cartographie à petite échelle de la couverture végétale. Au Canada, des données AVHRR, reçues à Prince Albert en Saskatchewan, sont utilisées dans un système d'information sur les récoltes. Le système sert à la surveillance de la santé des récoltes de céréales dans les Prairies durant toute la période de croissance.



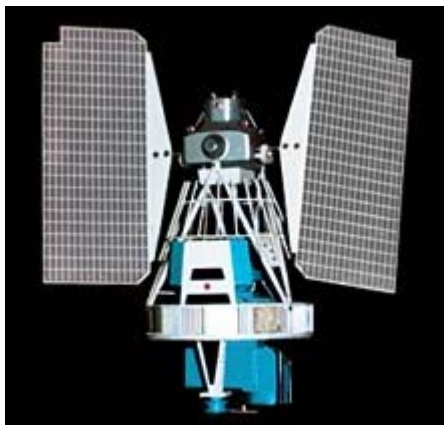
Autres satellites météorologiques

Les États-Unis exploitent la série de satellites DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) qui sont aussi utilisés pour la surveillance météorologique. Le capteur OLS (Operational Linescan System) de ces satellites en orbite polaire fournit une couverture deux fois par jour, avec une fauchée de 3000 km et une résolution spatiale de 2,7 km. Il possède deux grandes bandes spectrales : une bande qui s'étend du visible au proche-infrarouge (0,4 à 1,1 μm) et une bande infrarouge thermique (10,0 à 13,4 μm). Ce capteur peut notamment acquérir des images le soir, dans des conditions d'illumination très faibles dans la bande du visible. Cela lui permet de prendre des images étonnantes de la Terre sur lesquelles on peut apercevoir la pollution lumineuse des grands centres urbains.

Il existe plusieurs autres satellites météorologiques en orbite qui ont été lancés et qui sont exploités par d'autres pays ou groupe de pays dont le Japon avec la série GMS, et la communauté européenne avec les satellites Météosat. Les deux séries sont composées de satellites géostationnaires situés au-dessus de l'équateur et aux mêmes degrés de longitude que le Japon et l'Europe. Ces satellites prennent des images toutes les demi-heures, comme les satellites GOES. Les satellites GMS possèdent deux bandes : l'une de 0,5 à 0,75 μm (résolution spatiale de 1,25 km) et l'autre de 10,5 à 12,5 μm (résolution spatiale de 5 km). Météosat possède trois bandes : une bande dans le visible (0,4 à 1,1 μm , résolution spatiale de 2,5 km), une dans l'IR moyen (5,7 à 7,1 μm , résolution spatiale de 5 km), et une dans l'IR thermique (10,5 à 12,5 μm , résolution spatiale de 5 km).

2.12 Satellites et capteurs d'observation de la Terre

Landsat



Bien que plusieurs satellites météorologiques (comme ceux décrits dans la section précédente) soient également utilisés pour la surveillance de la surface de la Terre, ceux-ci n'ont pas été conçus pour la cartographie détaillée de la surface terrestre. Suite aux succès éclatants des premières images des satellites météorologiques dans les années 60, et par les images acquises lors des missions spatiales habitées, le premier satellite d'observation Landsat-1 a été lancé par la NASA en 1972. Connu à l'origine sous l'acronyme ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), Landsat avait été conçu pour tester la faisabilité d'une plate-forme multispectrale d'observation

de la Terre non habitée. Depuis, le programme Landsat a permis l'acquisition de données sur tous les coins de la planète. Le programme Landsat qui était gérée à l'origine par la NASA, est sous la responsabilité de la NOAA, en 1983. En 1985, le programme a été commercialisé pour fournir des données aux divers utilisateurs civils.

Parmi les facteurs qui ont contribué au succès de Landsat, il faut mentionner une combinaison de capteurs avec des domaines spectraux façonnés pour l'observation de la Terre, une résolution spatiale fonctionnelle et une bonne couverture du globe (fauchée et répétitivité). La longévité du programme a permis d'accumuler des archives de données volumineuses sur les ressources terrestres, ce qui facilite la surveillance à long terme ainsi que le maintien des données historiques et de la recherche. Tous les satellites Landsat ont été placés en orbite héliosynchrone polaire. Les trois premiers satellites (Landsat-1 à Landsat-3) se situaient à une altitude de 900 km avec une répétitivité de 18 jours, tandis que les derniers orbitent à une altitude approximative de 700 km avec une répétitivité de 16 jours. Tous les satellites Landsat croisent l'équateur le matin pour profiter des conditions d'illumination optimales.

Les satellites de la série Landsat portent plusieurs capteurs comme les systèmes de caméras RBV (Return Beam Vidicon), le système MSS (Multi Spectral Scanner), et plus tard, le TM (Thematic Mapper) Chacun de ces capteurs a une fauchée de 185 km, avec une scène complète de 185 km sur 185 km.

Le MSS capte le rayonnement électromagnétique de la surface de la Terre provenant de quatre bandes spectrales. Chaque bande possède une résolution spatiale de 60 sur 80 mètres, et une résolution radiométrique de 6 octets, ou de 64 valeurs numériques. Le MSS capte le rayonnement avec un balayeur mécanique qui utilise un miroir oscillant. Six lignes de balayage peuvent être recueillies simultanément avec chaque balayage d'est en ouest du miroir. Le tableau suivant décrit les domaines spectraux des bandes MSS.

Bandes MSS

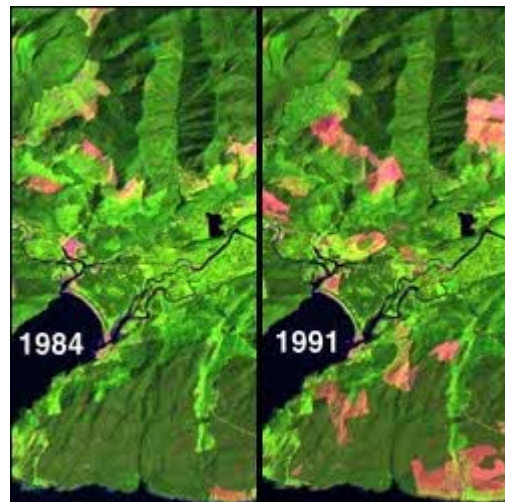
Bandes		Longueurs d'ondes (microns)
Landsat 1,2,3	Landsat 4,5	
MSS 4	MSS 1	0,5 - 0,6 (vert)
MSS 5	MSS 2	0,6 - 0,7 (rouge)
MSS 6	MSS 3	0,7 - 0,8 (proche infrarouge)
MSS 7	MSS 4	0,8 - 1,1 (proche infrarouge)

La collecte routinière de données MSS a cessé en 1982 à cause de l'utilisation des données TM qui a commencé avec Landsat 4. Le capteur TM capteur MSS, le capteur TM apporte plusieurs améliorations : une meilleure résolution spatiale et radiométrique, des bandes spectrales plus étroites, sept bandes spectrales par rapport à quatre pour le MSS, et une augmentation du nombre de détecteurs par bandes (seize pour les bandes non thermiques par rapport à six pour MSS). Seize lignes de balayage sont captées simultanément pour chaque bande spectrale non thermique (quatre pour les bandes thermiques). Les seize lignes sont captées simultanément à l'aide d'un miroir oscillant qui balaie à l'aller (de l'ouest vers l'est) et au retour (de l'est vers l'ouest) du miroir. Cette différence par rapport au capteur MSS augmente le temps d'arrêt sur un objet et améliore l'intégrité géométrique et radiométrique des données. La limite de résolution spatiale du TM est de 30 m pour toutes les bandes, sauf l'infrarouge thermique qui est de 120 m. Toutes les bandes sont enregistrées sur une étendue de 256 valeurs numériques (8 octets). Le tableau suivant décrit la résolution spectrale des bandes individuelles TM et leurs applications.

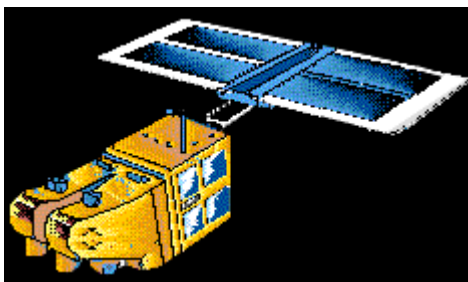
Bandes TM

Bandes	Domaine spectral (microns)	Application
TM 1	0,45 - 0,52 (bleu)	discrimination entre le sol et la végétation, bathymétrie/cartographie côtière; identification des traits culturels et urbains
TM 2	0,52 - 0,60 (vert)	cartographie de la végétation verte (mesure le sommet de réflectance); identification des traits culturels et urbains
TM 3	0,63 - 0,69 (rouge)	discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles; (absorption de chlorophylle); identification des traits culturels et urbains
TM 4	0,76 - 0,90 (proche IR)	identification des types de végétation et de plantes; santé et contenu de la masse biologique; délimitation des étendues d'eau; humidité dans le sol
TM 5	1,55 - 1,75 (IR de courte longueur d'onde)	sensible à l'humidité dans le sol et les plantes; discrimination entre la neige et les nuages
TM 6	10,4 - 12,5 (IR thermique)	discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol relié au rayonnement thermique; cartographie thermique
TM 7	2,08 - 2,35 (IR de courte longueur d'onde)	discrimination entre les minéraux et les types de roches; sensible au taux d'humidité dans la végétation

Les données des capteurs TM et MSS sont utilisées pour plusieurs applications comme la gestion des ressources, la cartographie, la surveillance de l'environnement et la détection du changement (par exemple, la surveillance des coupes à blanc). Les archives d'images canadiennes comprennent plus de 350 000 scènes MSS et 200 000 scènes TM. De plus, des compagnies et agences étrangères possèdent plusieurs autres scènes canadiennes.



SPOT

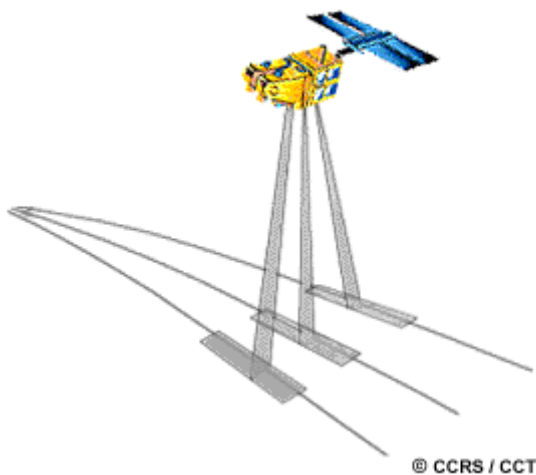


Le système SPOT (Système pour l'observation de la Terre) est une série de satellites d'observation de la Terre qui ont été conçus et lancés par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) de la France, avec l'aide de la Belgique et de la Suède. SPOT-1 a été lancé en 1986, et a été suivi d'autres satellites lancés à tous les trois ou quatre ans. Tous les satellites sont en orbite

héliosynchrone polaire à une altitude de 830 km, ce qui produit une répétitivité de 26 jours. Ils croisent l'équateur vers 10h30 heure solaire locale. Conçu dans le but d'acquérir des données de télédétection à des fins commerciales, SPOT et a été le premier satellite à utiliser la technologie du balayage à barrettes ou balayage longitudinal.

Tous les satellites SPOT ont deux balayeurs multibandes HRV (haute résolution visible) à barrettes, qui peuvent être opérés indépendamment ou simultanément. Chaque HRV peut capter en mode panchromatique (une seule bande) et offre une excellente limite de résolution spatiale de 10 m. Ils peuvent aussi capter en mode multibande (MLA) (trois bandes) qui offre une résolution spatiale de 20 m. Chaque balayeur à barrettes est composé de quatre rangs linéaires de détecteurs : un de 6 000 éléments pour l'enregistrement en mode panchromatique, et un de 3 000 éléments pour chacune des trois bandes multispectrales. La fauchée pour les deux modes est de 60 km à partir du nadir. Le tableau suivant décrit les caractéristiques spectrales des deux modes.

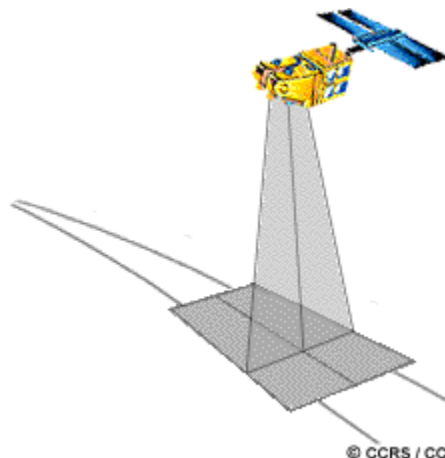
Mode / bande	Domaine spectral (microns)
Panchromatique (PLA)	0,51 - 0,73 (bleu-vert-rouge)
Multispectrale (MLA)	
Bande 1	0,50 - 0,59 (green)
Bande 2	0,61 - 0,68 (red)
Bande 3	0,79 - 0,89 (proche infrarouge)



L'angle de dépointage des capteurs peut être ajusté pour regarder des deux côtés de la ligne nadir. Ceci permet des visées obliques, ce qui augmente la répétitivité des satellites. Cette capacité de dépointage (jusqu'à 27 degrés à partir du nadir) permet aux satellites SPOT d'accéder à un couloir d'acquisition de 950 km et permet une répétitivité de plusieurs fois par semaine. Lorsque le capteur s'éloigne du nadir, la fauchée augmente de 60 à 80 km de large. En plus

d'améliorer la capacité de surveillance d'un site spécifique et d'augmenter les chances d'acquérir une scène sans nuages, la visée oblique permet aussi l'acquisition de données en stéréoscopie. Les images d'une même région enregistrées à partir de deux angles différents peuvent être visionnées et analysées en trois dimensions, une technique indispensable pour l'interprétation de terrain, la cartographie et les reproductions visuelles de terrain.

La visée oblique augmente à 3 jours la fréquence de répétitivité à l'équateur (7 fois durant un cycle de 26 jours). Les régions situées à une latitude de 45 degrés peuvent être visionnées 11 fois lors du cycle de 26 jours à cause de la convergence des orbites vers les pôles. En pointant les deux capteurs pour couvrir des traces au sol adjacentes, une trace au sol de 117 km (3 km de chevauchement) peut être visionnée. Ce mode d'opération permet l'acquisition de données panchromatiques ou multispectrales, mais pas les deux en même temps.



© CCRS / CCT



Le système SPOT présente plusieurs avantages par rapport aux autres capteurs spatiaux. Sa limite de résolution fine et le dépointage des capteurs sont les principales raisons de sa popularité. Les données de trois bandes multispectrales sont utiles pour afficher des images fausses-couleurs et la bande panchromatique peut être utilisée pour améliorer le détail des données

multispectrales. SPOT est utile pour les applications qui requièrent une excellente résolution spatiale (comme la cartographie urbaine) et combine également les avantages d'un coût abordable et de pouvoir acquérir des données satellites au moment idéal. Les images SPOT trouvent plusieurs applications dans des domaines qui nécessitent des images fréquentes, tels que la foresterie et l'agriculture. L'acquisition d'images stéréoscopiques a joué un rôle important pour les applications en cartographie et pour la dérivation d'information topographique (modèle numérique de terrain - MNT) des données satellitaires.

IRS

La série des satellites IRS (Indian Remote Sensing satellite) combine les caractéristiques des capteurs de Landsat MSS et TM et du capteur HRV de SPOT. Le troisième satellite de la série, IRS-1C, lancé en décembre 1995, a trois capteurs : une caméra de haute résolution panchromatique à une bande (PAN), le capteur à quatre bandes LISS-III (Linear Imaging Self-scanning Sensor) de résolution moyenne, et le capteur à deux bandes WiFS (Wide Field of View) de faible résolution. Le tableau suivant décrit les caractéristiques de chaque capteur.

Capteurs de IRS

Capteur	Domaine spectral (microns)	Résolution spatiale	Largeur de la fauchée	Répétitivité (à l'équateur)
PAN	0,5 - 0,75	5,8 m	70 km	24 jours
LISS-II				
Vert	0,52 - 0,59	23 m	142 km	24 jours
Rouge	0,62 - 0,68	23 m	142 km	24 jours
Proche IR	0,77 - 0,86	23 m	142 km	24 jours
IR moyen	1,55 - 1,70	70 m	148 km	24 jours
WiFS				
Rouge	0,62 - 0,68	188 m	774 km	5 jours
Proche IR	0,77 - 0,86	188 m	774 km	5 jours

En plus de sa haute résolution spatiale, le balayage linéaire du capteur panchromatique peut être dépointé jusqu'à 26 degrés, ce qui permet d'acquérir des images stéréoscopiques et d'augmenter la répétitivité du satellite (jusqu'à 5 jours), comme pour les satellites SPOT. Les données à haute résolution sont utiles pour les applications comme la planification urbaine et la cartographie. Les quatre bandes multispectrales LISS-III ressemblent aux bandes 1 à 4 du capteur TM de Landsat. Celles-ci sont utiles pour la discrimination de la végétation, la cartographie terrestre, et pour la gestion des ressources naturelles. Le capteur WiFS est semblable aux bandes AVHRR de NOAA. La résolution spatiale de ce capteur ainsi que son recouvrement sont utilisés pour la surveillance de la végétation à l'échelle régionale.

MEIS-II and CASI

Même s'il est surtout question des capteurs satellitaires dans ce cours, nous allons faire un bref survol de quelques capteurs aéroportés canadiens qui sont utilisés dans plusieurs types d'applications en télédétection. Les capteurs ont influencé la conception, ainsi que le développement des systèmes satellitaires. Le capteur MEIS-II (Multispectral Electro-Optical Imaging Scanner) fut développé pour le Centre canadien de télédétection. Même si MEIS n'est plus opérationnel, il fut le premier capteur à barrettes (ou balayage longitudinal) sur une plate-forme aéroportée. Le capteur recueillait des données de 8 octets (256 valeurs numériques) en utilisant des rangées linéaires de 1728 détecteurs par bandes pour 8 bandes spectrales allant de 0,39 à 1,1 microns. Il était possible de choisir la largeur spécifique des longueurs d'onde, ce qui permettait de faire différentes combinaisons pour différentes applications. On pouvait également faire l'acquisition d'images stéréoscopiques à partir d'une

seule ligne de vol en ayant des bandes pointant devant et derrière le nadir en complément aux autres bandes qui pointaient le nadir. La cartographie stéréoscopique, ainsi que la possibilité qu'offrait le capteur MEIS-II de choisir les bandes se sont avérées utiles pour la recherche et le développement des systèmes de capteurs.

CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) le premier spectromètre commercial, fut un des capteurs pionniers dans le monde de l'acquisition d'images aéroportées. En utilisant un balayeur à barrettes (à balayage longitudinal), le capteur hyperspectral capte une série d'étroites bandes spectrales dans les longueurs d'onde visible et infrarouge. L'étendue spectrale que recouvrent les 288 canaux se situent entre 0,4 et 0,9 microns. Chaque bande couvre une largeur de 0,018 microns. La résolution spatiale dépend de l'altitude de l'avion, tandis que les bandes spectrales mesurées et la largeur des bandes utilisées sont programmables pour s'ajuster aux demandes des utilisateurs. Les détecteurs hyperspectraux comme CASI, sont d'importantes sources d'information sur les caractéristiques d'absorption et de réflexion de cibles spécifiques. Les détecteurs nous fournissent une "empreinte" spectrale d'une cible. Les essais avec le CASI et d'autres spectromètres imageurs ont aidé au développement des systèmes de détecteurs hyperspectraux des systèmes satellitaires avancés.

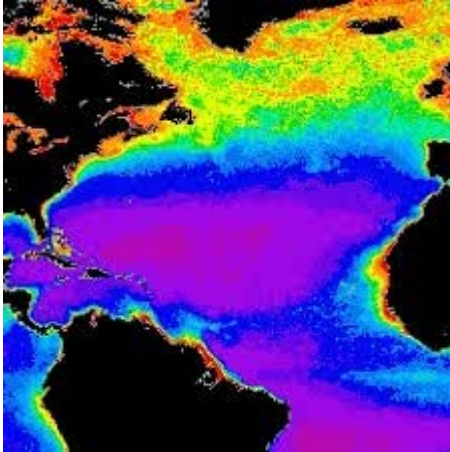
2.13 Satellites et capteurs d'observation marine

Les océans recouvrent plus des deux tiers de la surface de la Terre et jouent un rôle important dans le système climatique de la planète. Ils contiennent aussi une grande variété d'organismes vivants et de ressources naturelles qui sont sensibles à la pollution et aux autres dangers créés par les humains. Les satellites et capteurs de météorologie et d'observation de la Terre que nous avons décrits dans les deux sections précédentes peuvent être utilisés pour la surveillance des océans, mais il existe d'autres systèmes de satellites et de capteurs qui ont été construits à ces fins.

Le satellite Nimbus-7, lancé en 1978, portait le CZCS (Coastal Zone Colour Scanner), le premier capteur spécifiquement conçu pour la surveillance des océans et des étendues d'eau. Le principal objectif de ce capteur était d'observer la couleur et la température de l'océan, particulièrement dans les régions côtières. La résolution spatiale et spectrale permettait de détecter les polluants dans les couches supérieures de l'océan et de déterminer la nature des matériaux en suspension dans la colonne d'eau. Le satellite Nimbus-7 a été placé en orbite héliosynchrone polaire à une altitude de 955 km. Les heures de passage à l'équateur étaient fixées à midi heure locale pour les passes ascendantes, et à minuit heure locale pour les passes descendantes. Le cycle de répétition du satellite permettait une couverture complète de la Terre tous les six jours, ou toutes les 83 orbites. Le capteur CZCS avait six bandes spectrales dans les parties visible, proche infrarouge, et infrarouge thermique du spectre, chacune recueillant des données à une résolution spatiale de 825 m au nadir, sur une largeur de fauché de 1566 km. Le tableau suivant décrit les longueurs d'onde de chaque bande et le paramètre primaire mesuré par chacune.

Bandes spectrales CZCS

Bandes	Domaine spectral (microns)	Paramètre primaire mesuré
1	0,43 - 0,45	Absorption de chlorophylle
2	0,51 - 0,53	Absorption de chlorophylle
3	0,54 - 0,56	Gelbstoffe (substance jaune)
4	0,66 - 0,68	Concentration de chlorophylle
5	0,70 - 0,80	végétation de surface
6	10,5 - 12,50	température de surface



Comme le tableau le démontre, les quatre premières bandes du capteur CZCS sont très étroites. Elles ont été optimisées pour permettre la discrimination détaillée des différences de réflectance de l'eau causées par les concentrations de phytoplancton et des autres particules en suspension dans l'eau. En plus de détecter la végétation à la surface de l'eau, la bande 5 était utilisée pour différencier l'eau de la terre avant de traiter les autres bandes d'information. Le capteur CZCS a cessé de fonctionner en 1986.

MOS

Le premier capteur MOS-1 (Marine Observation Satellite) a été lancé en février 1987 par le Japon, et a été suivi par MOS-1b, en février 1990. Ces satellites portent trois différents capteurs : un radiomètre multispectral électronique à autobalayage (MESSR) à quatre bandes, un radiomètre du visible et de l'infrarouge thermique (VTIR) à quatre bandes, et un radiomètre micro-ondes à balayage (MSR) à deux bandes. Le tableau suivant décrit les deux capteurs du visible / infrarouge.

Capteur	Domaine spectral (microns)	Résolution spatiale	Largeur de la fauchée
MESSR	0,51 - 0,59	50 m	100 km
	0,61 - 0,69	50 m	100 km
	0,72 - 0,80	50 m	100 km
	0,80 - 1,10	50 m	100 km
VTIR	0,50 - 0,70	900 m	1500 km
	6,0 - 7,0	2700 m	1500 km
	10,5 - 11,5	2700 m	1500 km
	11,5 - 12,5	2700 m	1500 km

Les bandes du MESSR ont un domaine spectral semblable au capteur MSS de Landsat; elles sont donc utiles pour les applications terrestres en plus des observations marines. Les systèmes MOS sont en orbite autour de la Terre à une altitude de 900 km et ont une répétitivité de 17 jours.

SeaWiFS

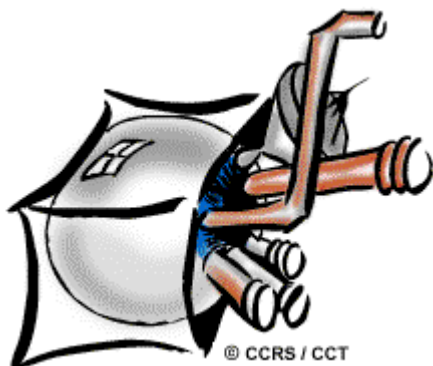
Le capteur SeaWiFS (Sea-viewing Wide-Field-of-View) à bord du satellite SeaStar est un capteur de pointe, conçu pour la surveillance des océans. Il contient 8 bandes spectrales de domaine spectral très étroit (voir le tableau ci-dessous), conçu spécifiquement pour la détection et la surveillance de phénomènes océaniques variés comme : la production primaire des océans et des processus de plancton, l'influence des océans sur les processus climatiques (emmagasinement de chaleur et formation d'aérosol), et la surveillance des cycles du carbone, du soufre et de l'azote. L'altitude de son orbite est de 705 km et l'heure locale de passage à l'équateur est fixée à midi. Deux combinaisons de résolution spatiale et de largeur de fauchée sont disponibles pour chaque bande : un mode avec une résolution de 1,1 km (au nadir) avec une fauchée de 2800 km, et un mode avec une plus faible résolution de 4,5 km (au nadir) avec une fauchée de 1500 km.

Bandes spectrales de SeaWiFS

Bandes	Domaine spectral (microns)
1	0,402 - 0,422
2	0,433 - 0,453
3	0,480 - 0,500
4	0,500 - 0,520
5	0,545 - 0,565
6	0,660 - 0,680
7	0,745 - 0,785
8	0,845 - 0,885

Ces satellites d'observation marine sont importants pour la surveillance de la pollution et de la santé des océans à l'échelle mondiale et régionale. Ils aident aussi aux scientifiques à comprendre l'influence et l'impact des océans sur le système climatique de la Terre.

2.14 Autres détecteurs



Les trois sections précédentes nous ont permis de faire un survol de certains systèmes disponibles en télédétection optique du spectre électromagnétique. Il existe aussi plusieurs autres types de détecteurs qui sont utiles à la télédétection. L'information n'est pas très détaillée, mais constitue une bonne introduction aux différentes sources et aux concepts alternatifs d'acquisition d'imagerie.

Vidéo

Les caméras vidéo sont un moyen utile et peu coûteux pour acquérir des données et des images avec annotation verbale. Par contre, la résolution spatiale est plus grossière que pour la photographie et les images numériques. La gestion de désastres naturels (feux, inondations), l'évaluation des moissons et des maladies, le contrôle de danger environnemental et la surveillance policière sont tous des exemples d'applications. Les caméras utilisées pour l'enregistrement vidéo mesurent la radiation dans les plages du visible, du proche infrarouge et parfois dans la portion de l'infrarouge moyen du spectre électromagnétique. Les données de l'image sont enregistrées sur bande magnétique et peuvent être immédiatement visualisées.

FLIR

Le système infrarouge à balayage frontal fonctionne de façon similaire au détecteur à balayage thermique latéral. Celui-ci fournit une perspective oblique plutôt que nadir de la surface de la Terre. Ce détecteur est normalement placé sur des avions ou des hélicoptères et acquiert des images de la région à l'avant de la plate-forme. Les systèmes à balayage frontal ont une résolution spatiale élevée. Les forces armées utilisent ce genre de système pour des opérations de secours, l'application de la loi et pour la surveillance des feux de forêt.

Fluorescence par laser

En recevant de l'énergie, certaines cibles deviennent fluorescentes ou émettent de l'énergie. Ceci n'est pas une simple réflexion de la radiation incidente, mais plutôt une absorption de l'énergie initiale, une excitation des composantes moléculaires du matériel des cibles, et une émission de radiations de plus grandes longueurs d'ondes qui est mesurée par le détecteur. La fluorescence par laser illumine la cible avec une radiation de longueur d'onde déterminée et est capable de détecter de multiples longueurs d'onde de radiation fluorescente. Cette technologie a été testée pour des applications océanographiques comme la cartographie de la chlorophylle, la détection de polluants, et surtout pour la détection de déversements accidentels ou naturels d'hydrocarbures.

Lidar

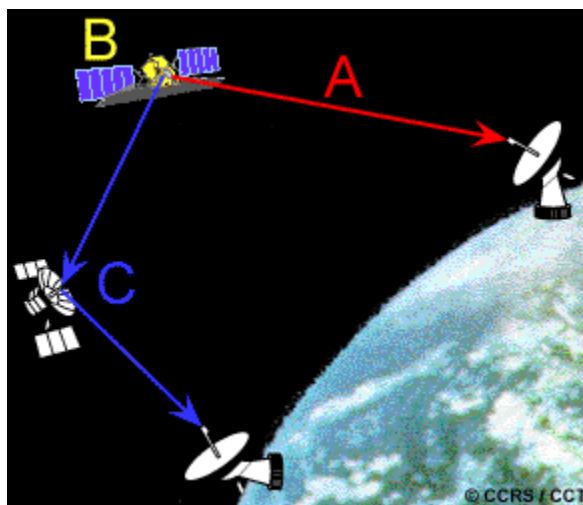
Le LIDAR (Light Detection and Ranging) est une technique d'imagerie active qui ressemble beaucoup à celle du RADAR. Ce système qui émet des impulsions de lumière laser et détecte l'énergie réfléchiée par la cible. Le temps requis par l'énergie pour rejoindre la cible et retourner au détecteur détermine la distance entre les deux. Ce système est utilisé de façon efficace afin de mesurer la hauteur de la canopée de la forêt par rapport à la surface du sol, et la profondeur de l'eau par rapport à la surface de l'eau (profilomètre laser). On utilise également le LIDAR pour faire des études atmosphériques pour examiner les particules contenues dans les différentes couches de l'atmosphère de la Terre, pour obtenir des mesures de densité de l'air, et pour la surveillance des mouvements atmosphériques.

RADAR

Le RADAR (Radio Detection and Ranging) est un système actif qui fournit sa propre source d'énergie électromagnétique. Les détecteurs, qu'ils soient aéroportés ou spatioportés, émettent de la radiation micro-onde dans une série d'impulsions à partir d'une antenne qui est positionnée vers la surface, perpendiculaire à la direction du mouvement. Lorsque l'énergie atteint la cible, une portion de l'énergie est réfléchiée vers le détecteur. La dispersion de la radiation micro-onde est alors détectée, mesurée et chronométrée. Le temps requis par l'énergie pour se rendre à la cible et retourner au détecteur détermine la distance de la cible. En enregistrant le délai et l'amplitude de l'énergie réfléchiée par toutes les cibles lors du passage du système, nous pouvons produire une image à deux dimensions de la surface. Puisque le RADAR a sa propre source d'énergie, nous pouvons obtenir des images le jour ou la nuit. Puisque l'énergie micro-onde peut également pénétrer à travers les nuages et la pluie, le RADAR est considéré comme un détecteur toutes saisons. Nous examinerons plus en détail les caractéristiques uniques du RADAR ainsi que l'étendue des applications de la télédétection micro-ondes au cours du chapitre 3.

2.15 Réception, transmission, et traitement des données

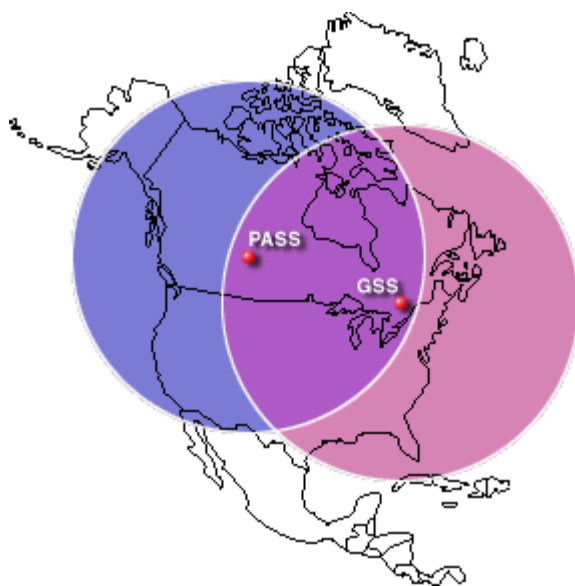
Les données acquises par un capteur aéroporté peuvent être recueillies une fois que l'avion est de retour au sol. Elles peuvent ensuite être traitées et, finalement, remises à l'utilisateur. Par contre, les données acquises par un satellite doivent être transmises électroniquement à une station de réception sur Terre, car le satellite demeure en orbite pour plusieurs années. Les méthodes de transmission développées pour les satellites peuvent aussi être utilisées dans le cas d'un avion s'il y a un besoin urgent des données au sol.



On utilise trois méthodes de transmission des données :

- A.** Les données peuvent être transmises directement à une station de réception sur Terre, si le satellite se situe dans le cercle de réception de la station.
- B.** Si le satellite n'est pas dans le cercle de réception d'une station, les données peuvent être stockées par un enregistreur à bord du satellite.
- C.** Les données peuvent être aussi retransmises à la station de réception par des satellites de communication qui sont en orbite géostationnaire autour de la Terre. Les données sont transmises de satellite à satellite jusqu'à ce qu'on puisse les retransmettre à la station.

Le Canada possède deux stations de réception de données satellitaires qui sont exploitées par le CCT : l'une est située à Cantley (GSS), tout près d'Ottawa, l'autre, à Prince Albert (PASS) en Saskatchewan. La combinaison des cercles de couverture de ces deux stations permet la réception des données transmises directement ou enregistrées par presque tous les satellites qui passent au-dessus du territoire canadien et des États-Unis continentaux. Plusieurs pays ont également construit des stations de réception tout autour de la Terre afin de recevoir les données des différents satellites en orbite.



Les données brutes parviennent à la station de réception sous forme numérique. Elles sont alors traitées pour corriger les distorsions atmosphériques, géométriques, et systématiques lorsque nécessaire. Elles sont ensuite converties dans un format standard et sont sauvegardées sur bandes magnétiques, disquettes ou CD-ROM. La plupart des stations de réception et de traitement conservent aussi en archives les données qu'elles acquièrent. Les agences gouvernementales et les entreprises privées prennent charge des archives de leurs capteurs respectifs.

Pour plusieurs capteurs, il est possible de fournir rapidement des images aux clients qui en ont un urgent besoin. Des systèmes de traitement en temps réel permettent de produire des images à faible résolution (sur papier ou numérique) au cours des quelques heures suivant l'acquisition. Ces images peuvent être retransmises aux clients par télécopieur ou en format numérique. Ce traitement rapide des données est utilisé pour fournir des images aux navires parcourant l'océan Arctique : les images facilitent la navigation dans les champs de glace car elles permettent aux pilotes des navires d'évaluer les conditions de la glace. Le traitement d'images en temps réel pour des capteurs aériens est utilisé pour envoyer des images infrarouges thermiques directement aux pompiers qui combattent un feu de forêt.

Les images à faible résolution "quick-look" sont utilisées pour vérifier les images archivées avant de les acheter. Bien que la qualité spatiale et radiométrique de ce type de produits soit inférieure, ils n'en demeurent pas moins utiles pour s'assurer que la qualité, la composition, et la couverture nuageuse sont acceptables.

2.16 Notes finales

Vous venez de compléter le Chapitre 2 - Satellites et Capteurs. Vous pouvez poursuivre avec le Chapitre 3 - Télédétection par micro-ondes ou aller fureter sur le site Web du CCT, où vous trouverez d'autres articles reliés aux plates-formes et aux capteurs.

Par exemple, vous pouvez interroger le « Glossaire de télédétection »¹, dans les catégories « plates-formes » et « capteurs » qui contiennent d'autres renseignements sur les différentes plates-formes et les différents capteurs, ainsi que leur utilisation. Le glossaire comprend également des catégories sous les termes « optique » et « radar », qui vous permettront d'en connaître davantage sur ces aspects de la technologie de la télédétection.

Nos stations de réception au sol de Prince Albert en Saskatchewan² et de Cantley au Québec³ reçoivent des données de nombreux satellites. Vous voudrez peut-être connaître à partir de quels satellites les stations de réception acquièrent leurs données, quelle est leur couverture de réception⁴ et quels services elles offrent⁵. Si vous êtes curieux au sujet de détecter les objets qui sont plus petits qu'un pixel, voir la [discussion détaillée](#)⁶ dans un de nos « Images du Canada ».

Jusqu'en 1997, le CCT disposait d'un [Convair 580](#)⁷, un avion qui a transporté à son bord un grand nombre d'instruments de recherche dont un [radar à synthèse d'ouverture](#)⁸ (RSO). Notre site Web comprend un grand nombre d'images acquises grâce à ce radar, parmi ces images se trouve celle du [pont de la Confédération](#)⁹, qui relie l'Île-du-Prince-Édouard au Nouveau-Brunswick, alors qu'il était en construction.

¹http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary/glossary_f.html

²http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/stations/pass_f.html

³http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/stations/gss_f.html

⁴http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/stations/cc_f.html

⁵http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/stations/grss_f.html

⁶http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tour/16/16ns_f.html

⁷http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbc580_f.html

⁸http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbmain_f.html

⁹http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/apps/marine/pei_link/bridge_f.html



2. Le saviez-vous?

2.1 Saviez-vous que...?



© CCRS / CCT

- Pour la photographie aérienne à main levée, les avions à ailes hautes sont meilleurs que les appareils à ailes basses.
- Les appareils de type « Beaver » et « Otter » de DeHavilland sont très utilisés pour la photographie aérienne verticale car ils possèdent une écoutille amovible sous la carlingue qui évite de devoir faire des modifications structurales importantes à l'appareil.
- Il est préférable d'effectuer des photographies aériennes obliques par la fenêtre ouverte pour éliminer la distorsion causée par le verre de la fenêtre.
- On prend souvent des photographies aériennes par l'ouverture de la porte d'un avion (la porte est enlevée avant le vol).
- On utilise parfois des ballons captifs comme moyen économique d'effectuer la surveillance à long terme d'un site particulier.

2.2 Le saviez-vous?

« On prévoit un ciel partiellement nuageux et une possibilité d'averse »

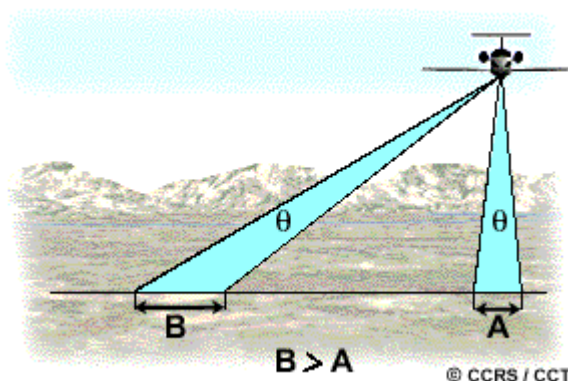
...La plupart des images satellitaires que vous voyez à la télévision lors des prévisions météorologiques sont des images provenant de satellites géostationnaires. Ces satellites ont une couverture très large et montrent les conditions météorologiques et nuageuses à l'échelle continentale. Les météorologues utilisent ces images afin de déterminer quelle direction les systèmes météorologiques prendront. La capacité de ces satellites de fournir plusieurs images de la même région permet de surveiller de près l'évolution du temps.



... L'orbite des satellites doit être corrigée occasionnellement. La friction causée par l'atmosphère terrestre est la principale cause de cette déviation du satellite de son orbite initiale. Afin de corriger la trajectoire, un centre de contrôle sur Terre envoie des instructions au satellite pour le replacer sur son orbite. La plupart des satellites ont une longévité de quelques années. À la fin de sa vie utile, un satellite peut simplement cesser de fonctionner adéquatement ou souffrir d'une trop grande déviation de son orbite, ce qui le rend inutilisable.

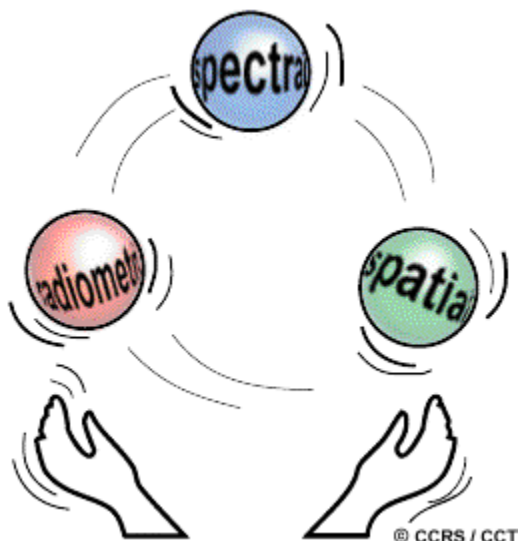
2.3 Le saviez-vous?

Si le champ de vue instantané de tous les pixels d'un balayeur est constant (ce qui se produit fréquemment), les pixels au nadir auront une échelle plus grande que les pixels situés en périphérie, ce qui signifie que la résolution spatiale de l'image variera de centre à la bordure de l'image.



2.5 Le saviez-vous?

« ...il faut parfois faire des compromis !... »



...Il y a des compromis à faire entre la résolution spatiale, spectrale et radiométrique lorsque les ingénieurs conçoivent un capteur. Pour avoir une résolution spatiale élevée, le capteur doit avoir un petit champ de vision instantanée (CVI). Ceci réduit donc la quantité d'énergie que reçoit le capteur puisque la superficie de résolution à l'intérieur du CVI doit être plus petite. Une diminution de la quantité d'énergie cause une diminution de la résolution radiométrique (la capacité de discriminer des différences d'intensité d'énergie). Pour augmenter la quantité d'énergie atteignant le capteur, et par le fait même la résolution radiométrique, sans réduire la résolution spatiale, il faut élargir l'intervalle de longueurs d'onde détecté par un canal du capteur. Ceci réduit la résolution spectrale du capteur. Inversement, une résolution spatiale plus grossière permettrait une résolution radiométrique plus grande et une résolution spectrale plus fine. Il faut donc bien doser les trois types de résolution afin de construire un capteur qui aura des caractéristiques intéressantes compte tenu de nos objectifs.

2.7 Saviez-vous que...?

« ...reculons pour mieux voir... »

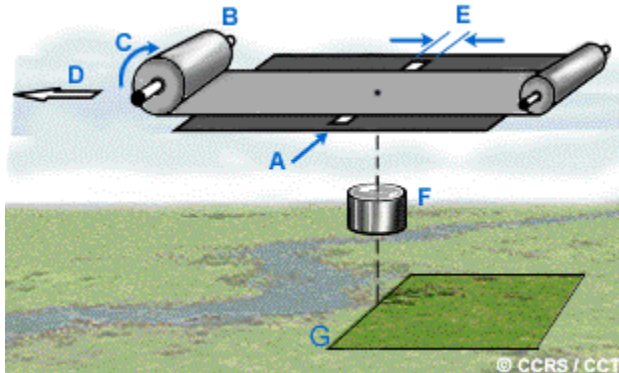


...La navette spatiale américaine a été utilisée pour prendre des photographies à partir de l'espace. Les astronautes à bord de la navette ont pris plusieurs photos en utilisant des appareils photo manuels similaires à ceux utilisés sur Terre pour prendre des photos de vacances. Ils ont aussi utilisé des appareils photo sophistiqués et beaucoup plus gros, installés dans la soute de la navette, appelés des appareils photo grands formats. Ces grands appareils photo ont une distance focale très grande (305 mm) et prennent des photographies de qualité qui couvrent des centaines de kilomètres. La dimension exacte dépend bien sûr de l'altitude de la navette. Les photos doivent être prises lorsque le Soleil illumine la Terre et elles sont sensibles au couvert nuageux et autres atténuations atmosphériques. La navette a aussi été utilisée plusieurs fois pour observer différentes régions de la Terre à l'aide d'un capteur actif d'hyperfréquences appelé un RADAR. Le capteur RADAR peut travailler aussi bien le jour que la nuit, puisqu'il émet sa propre énergie qui a la capacité de traverser les nuages grâce à la grande longueur d'onde de l'énergie qu'il émet. Nous traiterons des radars au chapitre 3.

...Même si la prise de photographies dans la bande des UV est problématique à cause de l'absorption et de la diffusion atmosphériques dans cette bande de longueurs d'onde, elle peut être utile là où d'autres types de photographie ne le sont pas. Par exemple, dans le domaine de la recherche et de la gestion de la faune, on a utilisé des photographies UV afin de détecter et de compter les phoques sur les banquises de neige et de glace. Les phoques adultes ont une fourrure foncée tandis que leurs rejetons sont blancs. Sur une photographie normale, les adultes sont visibles facilement car leur fourrure contraste avec la neige et la glace, mais les rejetons ne sont pas visibles. Cependant, la fourrure des adultes et des petits absorbe très fortement la radiation UV. Sur une photographie UV, les phoques adultes et les petits apparaissent donc très foncés, ce qui permet de les détecter facilement. Cette méthode fiable permet de surveiller les populations de phoques sur de très grandes régions.

2.8 Saviez vous que?

« ...quel balai... »

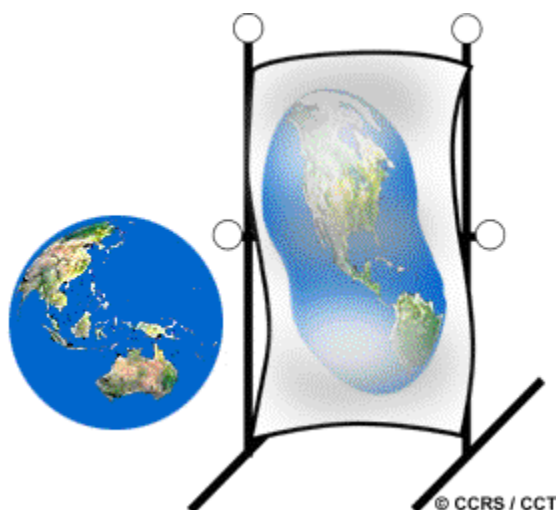


Il existe un équivalent photographique au capteur à barrettes : c'est l'appareil photographique à obturateur à fente. Cet appareil n'a pas vraiment d'obturateur, mais une fente (A) qui se déplace perpendiculairement à la direction de vol et qui expose la pellicule (B) qui se déplace de façon continue (C) devant la fente. La vitesse de déplacement de la pellicule doit être proportionnelle à la vitesse-sol (D) de la plate-forme. De plus, on doit ajuster la sensibilité aux conditions de vol au moment de l'acquisition. La largeur de la fenêtre (E) peut aussi être ajustée pour contrôler la durée d'exposition. Le résultat n'est pas une série de photos successives mais une bande-image continue. Il est aussi possible d'obtenir un stéréo-couple par cette méthode en utilisant un système à deux lentilles légèrement décalées, chacune exposant une moitié de la largeur de la pellicule.

2.10 Saviez-vous que...?

« ...à la recherche de sources thermiques vivantes, capitaine... »

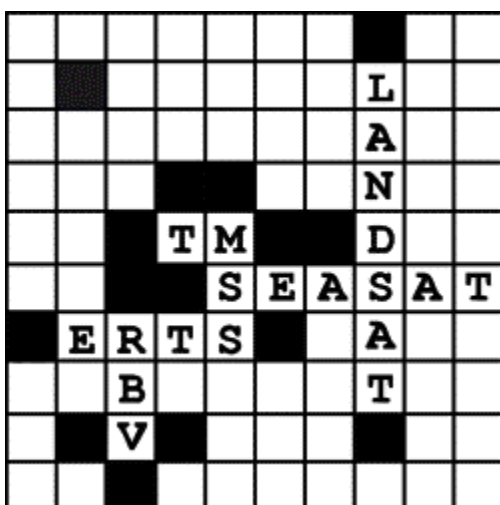
...Quelques systèmes de balayage à capteurs thermiques regardent la surface de façon oblique, comme c'est le cas pour certaines photos aériennes. Ces systèmes à balayage frontal fonctionnant dans l'infrarouge (FLIR) sont incorporés à un aéronef et pointent dans la direction du vol. Les systèmes FLIR produisent des images similaires aux photos aériennes latérales et sont utilisés dans des domaines variés, allant de la détection des feux de forêts à certaines applications de la loi.



...Plusieurs distorsions systématiques (ou prévisibles) peuvent être prises en considération immédiatement, c'est-à-dire lors de l'acquisition des données. Par exemple, la distorsion oblique qui apparaît avec les balayeurs perpendiculaires à la trajectoire. Cette distorsion est causée par la rotation de la Terre et peut être facilement calculée et corrigée. D'autres variations causant de la distorsion sont beaucoup plus difficiles à prévoir et nécessitent une correction géométrique faite par ordinateur après l'acquisition des données. Ce sujet sera traité au chapitre 4.

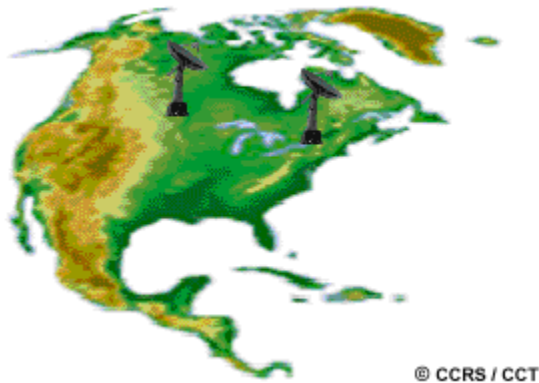
2.12 Saviez-vous que?

Le programme ERTS (Earth Resources Technology Satellite) fut rebaptisé Landsat tout juste avant le lancement du deuxième satellite de la série. Le nom Landsat a été utilisé afin de distinguer ce programme d'un autre programme satellitaire : Seasat, qui en était au stade de la planification. Ce dernier, était destiné aux applications océanographiques. Le premier (et le seul) satellite Seasat a été lancé avec succès en 1978, mais fut en opération pour une période de 99 jours seulement. Malgré sa courte durée de vie et l'abandon du programme, celui-ci a recueilli les premières images radars à partir de l'espace, ce qui a grandement contribué à augmenter l'intérêt pour la télédétection par radar. Aujourd'hui, il existe plusieurs satellites radars. Nous allons aborder les sujets du radar et des satellites radars au cours du prochain chapitre.



La combinaison numérique originale du détecteur MSS, soit bandes 4, 5, 6 et 7, provenait de leur séquence numérique après les 3 bandes du détecteur RBV (Return Beam Vidicon). Cependant, les bandes du MSS furent renumérotées de 1 à 4 à cause d'une défectuosité technique du détecteur RBV, et aussi parce que ce dernier ne faisait plus partie du chargement de détecteur de Landsat-4 lors de son lancement. Pour le détecteur TM, si on regarde l'étendue des longueurs d'onde de chaque bande, on constate que TM6 et TM7 sont en désordre en terme d'augmentation de longueur d'onde croissantes. Ceci est dû au fait que la bande TM7 a été conçue après le processus de planification originale du système.

2.15 Saviez-vous que...?



...Les stations de réception du Canada sont en activité depuis 1972 à Prince Albert en Saskatchewan, et depuis 1985 à Gatineau au Québec. Ces deux stations reçoivent et traitent des images de satellites divers (NOAA, Landsat, RADARSAT, J-ERS, MOS, SPOT, et ERS) exploités par cinq différents pays ou groupes de pays (États-Unis, Canada, Japon, France, et l'Europe).



2. Questions éclairs et réponses

2.2 Questions éclairs

1. Quels sont les avantages des capteurs placés à bord des satellites par rapport aux capteurs placés à bord d'un avion? Ces capteurs sur plate-forme spatiale ont-ils des désavantages?

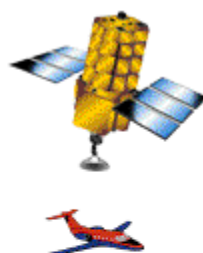


© CCRS / CCT

2. Un satellite à orbite quasi-polaire et héliosynchrone passe au-dessus de l'équateur terrestre à la même heure solaire locale tous les jours. La vitesse orbitale du satellite fait en sorte que tous les autres points nadirs situés le long de cette orbite sont visités un peu avant ou un peu après cette heure. Pour un capteur enregistrant l'énergie dans la partie visible du spectre d'énergie, quels sont les avantages et les désavantages d'un passage au-dessus de l'équateur (heure solaire locale) a) tôt le matin, b) autour de midi, et c) au milieu de l'après-midi?

2.2 Réponses

1 : Les capteurs à bord des satellites "observent" une portion de la surface de la Terre qui est généralement beaucoup plus large que les capteurs placés à bord d'un avion. De plus, les satellites tournent continuellement autour de la Terre, ce qui facilite l'acquisition de données de façon systématique et répétitive pour étudier les changements dans le temps. La position géométrique d'un satellite par rapport à la Terre peut être calculée de façon assez précise, ce qui facilite la correction des images satellitaires et leur positionnement sur une grille géographique. Cependant, les capteurs placés à bord d'un avion ont la flexibilité de pouvoir acquérir des données à la surface de la Terre n'importe où et n'importe quand (si les conditions météo le permettent), tandis que les capteurs spatioportés sont limités à des acquisitions de données à des endroits et à des moments déterminés par leur orbite.



© CCRS / CCT

2 : Lors d'un passage du satellite au-dessus de l'équateur tôt le matin, le Soleil est bas dans le ciel, ce qui est avantageux pour accentuer les effets topographiques; par contre, cette situation a aussi pour effet de créer beaucoup d'ombres dans les régions à fort relief. Un passage autour de midi permet une illumination maximale et uniforme puisque le Soleil est au point le plus élevé dans le ciel. Cette situation est avantageuse pour observer les surfaces peu réfléchissantes, mais peut aussi causer une saturation des capteurs pour les surfaces très réfléchissantes comme la glace. Il peut aussi se produire un phénomène de réflexion spéculaire pour les surfaces planes, ce qui complique l'interprétation des données. Pour un passage au milieu de l'après-midi, les conditions d'illumination sont plus modérées. Cependant, le phénomène de réchauffement solaire de la surface, maximal à cette période de la journée, peut rendre plus difficile l'enregistrement de l'énergie réfléchie. Afin de minimiser tous ces effets, la plupart des satellites possédant des capteurs d'énergie visible et infrarouge ont une heure solaire locale de passage au-dessus de l'équateur qui est au milieu de la matinée.

2.3 Questions éclairs

1. Regardez attentivement les détails de ces deux images. Laquelle a la plus petite échelle ? Quels indices avez-vous utilisés? Quelle est la plate-forme la plus probable à partir de laquelle l'image ayant la plus petite échelle a été obtenue?



2. Pour effectuer la surveillance de la santé générale du couvert végétal dans les provinces des prairies canadiennes sur une durée de plusieurs mois, quel type de plate-forme et de capteur (en termes de résolution spatiale, spectrale et temporelle) serait le meilleur choix et pourquoi?

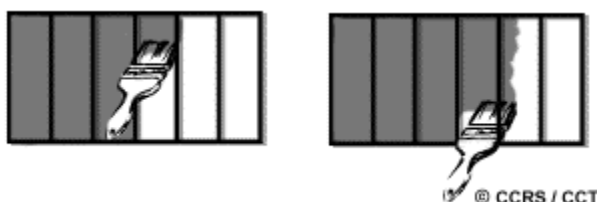
2.3 Réponses

1 : L'image de gauche provient d'un satellite, tandis que l'image de droite est une photographie prise à partir d'un avion. La superficie totale couverte par l'image de droite est aussi couverte dans l'image de gauche, quoiqu'il soit difficile de le remarquer étant donné la grande différence entre les échelles des deux images. Il est possible d'identifier des objets assez petits dans l'image de droite (ex. : des édifices). Ces éléments ne sont pas visibles dans l'image de gauche. Les caractéristiques identifiables dans l'image de gauche sont plutôt des rues, des rivières, des ponts. Comme les caractéristiques sont plus grandes dans l'image de droite, on peut conclure que cette image est à une échelle plus grande. Une certaine distance sur cette image représente une distance moins grande au sol que pour l'autre image. L'image de droite est une photo aérienne des édifices du parlement canadien à Ottawa, tandis que l'image de gauche est une image satellitaire de la ville d'Ottawa.

2 : Pour effectuer la surveillance de la santé générale du couvert végétal dans les provinces des prairies canadiennes sur une durée de plusieurs mois, quel type de plate-forme et de capteur (en termes de résolution spatiale, spectrale et temporelle) serait le meilleur choix et pourquoi?

2.4 Questions éclaircs

1. Les systèmes à balayage hyperspectral (mentionnés à la section 2.4) sont des capteurs multispectraux spéciaux qui détectent et enregistrent la radiation pour quelques centaines de bandes spectrales très étroites. Quels sont les avantages de ce type de capteurs? Quels en sont les désavantages?



2. Dites s'il y aura chevauchement entre les 288 bandes de CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) si le domaine spectral de toutes les bandes est exactement de 0,40 nm à 0,90 nm, et si chaque bande couvre 1,8 nm (nanomètre = 10^{-9}).

2.4 Réponses

1 : Les systèmes à balayage hyperspectral ont une très grande résolution spectrale. La radiation est donc mesurée selon des bandes de longueurs d'ondes très étroites, ce qui permet de construire un spectre presque continu de la radiation détectée pour chaque pixel dans l'image. Ceci permet de faire la distinction entre des cibles très fines en se basant sur leurs caractéristiques de réflectivité. Cependant, cette plus grande sensibilité du capteur implique une l'augmentation considérable de la quantité d'information à traiter. La grande quantité de données rend plus difficile leur manipulation et leur stockage. L'analyse d'une combinaison de plusieurs images est difficile, de même que l'identification et l'analyse de la réponse obtenue pour chacune des bandes.

2 : L'étendue totale de longueur d'onde disponible est $0,50\mu\text{m}$ ($0,90 - 0,40\mu\text{m} = 0,50\mu\text{m}$). Si le capteur a 288 bandes d'une étendue de 1,8 nm chacune, nous pouvons calculer l'étendue totale de longueur d'onde de chaque bande s'il n'y a pas de chevauchement.

$$1.8 \text{ nm} = 1.8 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$1.8 \times 10^{-9} \text{ m} \times 288 = 0.0000005184 \text{ m}$$

$$0.0000005184 \text{ m} = 0.5184 \mu\text{m}$$

Puisque 0,5184 est supérieur à 0,50 OUI il y aura du chevauchement entre quelques-unes ou toutes les 288 bandes.

2.5 Question éclair



Quelle est la valeur numérique maximale possible lorsqu'une image numérique a une résolution radiométrique de 6 bits?

2.5 Réponse



Le nombre de valeurs numériques disponibles pour représenter une image est égal au nombre 2 à la puissance du nombre de bits. ($2^{\#}$ de bits). Le nombre de valeurs numériques dans une image de 6 bits est donc $2^6 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 64$. Comme les valeurs numériques commencent avec le nombre "0", la valeur maximale possible est 63.

2.9 Question éclair



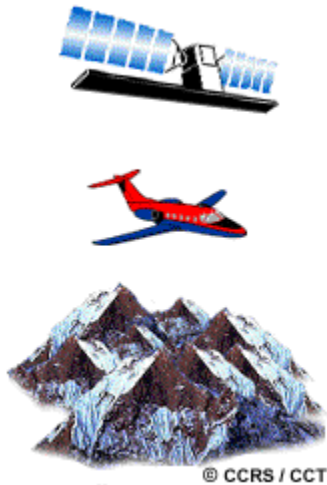
Les images provenant de capteurs thermiques peuvent-elles être utiles dans un environnement urbain?

2.9 Réponse



On utilise souvent les capteurs thermiques pour détecter et surveiller les pertes d'énergie par les édifices dans les villes. Le coût du chauffage est très élevé dans les pays nordiques comme le Canada. Les images des secteurs résidentiels et commerciaux des villes, obtenues à l'aide de capteurs thermiques, permettent d'identifier les édifices ou les parties d'édifices qui perdent le plus d'énergie. Ceci permet de cibler les réparations aux endroits qui montrent les plus grandes pertes d'énergie afin de réduire le coût des réparations, du chauffage et de permettre de conserver l'énergie.

2.10 Questions éclairs



Pour faire la cartographie d'une région montagneuse en limitant la distorsion géométrique, serait-il préférable d'utiliser un système à bord d'un avion ou à bord d'un satellite?

2.10 Réponse question éclair

Même si un système de balayage à bord d'un avion peut avoir une bonne précision géométrique, un système à bord d'un satellite serait préférable dans les régions montagneuses. Avec un système aéroporté, la distorsion géométrique causée par le déplacement du relief serait beaucoup plus importante à cause de la faible altitude de l'avion par rapport aux grandes variations dans le relief. De plus, avec la même illumination solaire, les ombres causées par le relief auraient un plus grand impact négatif avec un système aéroporté, en raison du plus petit champ de vision de ce système. Il serait presque impossible de faire la cartographie des zones ombragées avec ce système.

2.12 Questions éclaircs



Expliquez pourquoi les données du capteur Landsat TM peuvent être considérées plus utiles que les données du capteur MSS original. (Pensez à leurs résolutions spatiale, spectrale, et radiométrique).

2.12 Réponses



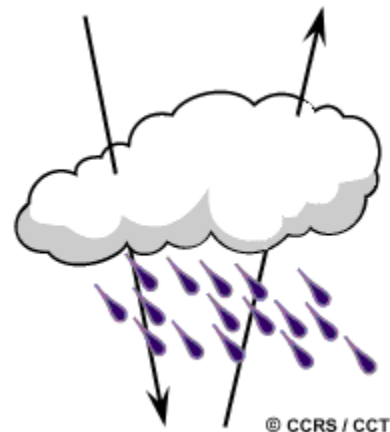
Il y a plusieurs raisons pour lesquelles les données TM peuvent être considérées plus utiles que les données MSS. Même si les scènes TM couvrent la même superficie que celles du MSS, le TM offre une meilleure résolution spatiale, spectrale, et radiométrique. La tache au sol du TM est de 30 m, à comparer à 80 m pour le MSS (sauf pour les bandes thermiques, qui mesurent entre 120 m à 240 m). Donc, le détail spatial est meilleur avec TM. Il possède aussi plus de bandes spectrales qui couvrent une étendue plus étroite de longueurs d'onde et qui sont plus utiles à certaines applications, particulièrement la discrimination de la végétation. De plus, l'augmentation de 6 à 8 octets pour l'enregistrement des données représente une augmentation de quatre fois la résolution radiométrique des données (souvenez-vous que $2^6 = 64$ et $2^8 = 256$, donc $256/64 = 4$). Mais ceci ne veut pas dire que les données TM sont "meilleures" que celles de MSS. Les données MSS sont toujours utilisées et fournissent une excellente source de données pour plusieurs applications. Lorsque l'information désirée ne peut être extraite des données MSS, les meilleures résolutions spatiale, spectrale, et radiométrique des données TM deviennent plus utiles.



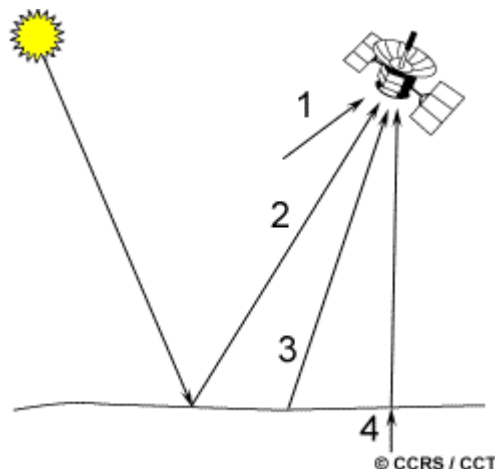
3. Télédétection de hyperfréquences

3.1 Introduction

La détection par **hyperfréquences (micro-ondes)** comprend la forme active et la forme passive de la télédétection. Comme nous l'avons décrit dans le chapitre 2, la portion du spectre des hyperfréquences couvre une longueur d'onde d'une étendue variant de 1 centimètre à 1 mètre. Ces longueurs d'onde sont grandes par rapport aux ondes visibles et infrarouges, les hyperfréquences ont donc des propriétés particulières en télédétection. Les ondes les plus longues passent au travers de la couche nuageuse, la bruine, la poussière et la pluie fine puisqu'elles ne sont pas sensibles à la diffusion atmosphérique qui affecte les ondes plus courtes. Cette propriété permet la détection dans presque toutes les conditions atmosphériques, et donc l'acquisition de données en tout temps.



La télédétection passive par hyperfréquences est semblable à la télédétection thermique. Tout objet émet une certaine quantité d'énergie dans les hyperfréquences, mais la magnitude en est généralement très faible. Un capteur passif détecte l'énergie dans les hyperfréquences émises naturellement dans son champ de vision. Cette énergie est fonction de la température et de l'humidité de l'objet sur la surface émettrice. Les capteurs passifs sont habituellement des radiomètres ou des balayeurs et fonctionnent de la même manière que les systèmes dont il a été question précédemment. Toutefois, la détection de l'énergie dans les hyperfréquences requiert une antenne.

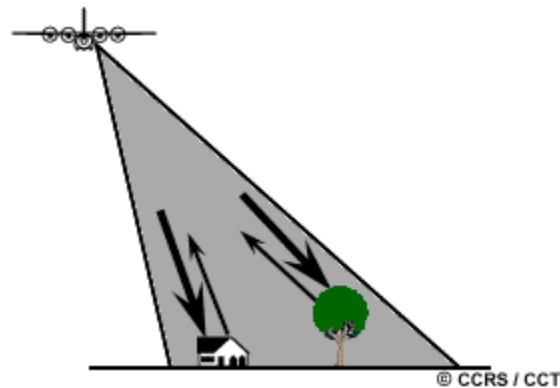


L'énergie enregistrée dans la partie du spectre des hyperfréquences par un capteur passif peut être émise par l'atmosphère (1), réfléchi du sol (2), émise par le sol (3) ou transmise du sous-sol (4). Parce que la longueur des ondes est aussi grande, l'énergie disponible est très petite par rapport aux longueurs d'onde visibles. Ainsi, le champ de vision doit être grand afin de détecter assez d'énergie pour enregistrer un signal. La plupart des capteurs à hyperfréquences sont donc caractérisés par une résolution spatiale faible.

Voici brièvement comment la télédétection dans les hyperfréquences intéresse plusieurs applications dont la météorologie, l'hydrologie et l'océanographie. En regardant "vers" ou "à travers" l'atmosphère, les météorologues peuvent utiliser les hyperfréquences pour mesurer des profils atmosphériques et pour déterminer la quantité d'eau ou d'ozone dans l'atmosphère. Puisque l'émission d'hyperfréquences est influencée par le taux d'humidité d'une cible, les hydrologues utilisent les hyperfréquences passives pour mesurer l'humidité du sol. Les applications océanographiques, quant à elles, comprennent la cartographie, les glaces de mer, les courants et les vents de surface, ainsi que la détection des polluants tels que les nappes d'hydrocarbures.

Les capteurs actifs à hyperfréquences

fournissent leur propre source de rayonnement pour illuminer la cible. Ils sont généralement divisés en deux catégories distinctes : les capteurs imageurs et les capteurs non-imageurs. Le plus répandu des systèmes actifs à hyperfréquences est le **radar**. De l'anglais (RAdio Detection And Ranging) radar veut dire détection et télémétrie par ondes radio. Les radars transmettent vers la cible un signal radio dans les hyperfréquences et détectent la partie rétrodiffusée du signal. L'intensité du signal rétrodiffusé est mesurée pour discerner les différentes cibles, et le délai entre la transmission et la réception du signal sert à déterminer la distance (ou la portée) de la cible.



Les capteurs à hyperfréquences non-imageurs incluent les altimètres et les diffusomètres. Dans la plupart des cas, ces instruments tracent le profil de la cible visée dans une seule dimension, contrairement aux capteurs imageurs qui sont bidimensionnels. Les altimètres radars transmettent de courtes impulsions d'hyperfréquences et mesurent le temps aller-retour jusqu'aux cibles pour déterminer la distance. Généralement, les altimètres pointent directement au nadir (sous la plate-forme) et peuvent ainsi mesurer la hauteur ou l'élévation de la cible (si l'altitude de la plate-forme est connue précisément). L'altimétrie radar est utilisée dans les avions pour déterminer l'altitude, et aussi à bord d'avions et de satellites pour la cartographie topographique et l'estimation de la hauteur de la surface de la mer. Les diffusomètres sont des capteurs qui ne fournissent pas d'images. Ils sont utilisés pour prendre des mesures précises de la quantité d'énergie rétrodiffusée par les cibles. La quantité d'énergie diffusée dépend des propriétés de la surface (telle que la rugosité) et de l'angle de

contact des ondes avec la cible. Les mesures de diffusion au-dessus des océans peuvent aussi être utilisées pour estimer les vents en se basant sur la rugosité de la surface de la mer. Les diffusomètres au sol sont utilisés pour mesurer précisément la diffusion provenant des différentes cibles afin de caractériser différents matériaux et types de surfaces. Ce concept est semblable au concept de signature de réflectance spectrale dans le visible.

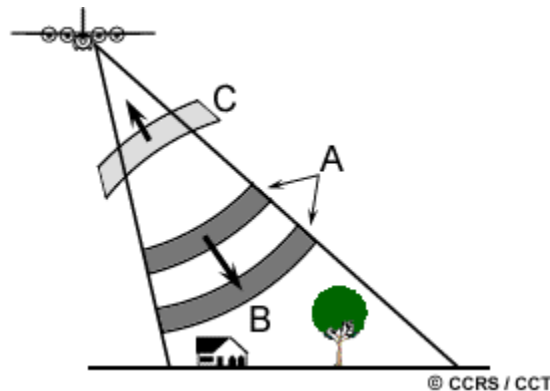
Le reste de ce chapitre, sera consacré à **l'imagerie radar**. Les radars actifs possèdent l'immense avantage de pouvoir pénétrer la couche nuageuse dans la plupart des conditions météorologiques. Puisque le radar est un capteur actif, il peut aussi être utilisé pour représenter la surface à n'importe quel moment du jour ou de la nuit. Ce sont là les deux principaux avantages du radar : imagerie sous **toutes conditions** et de **jour comme de nuit**. Fait important à comprendre, la différence fondamentale de fonctionnement qui existe entre le radar actif et les capteurs passifs (décrits au chapitre 2), font qu'une image radar est très différente et possède des propriétés distinctes des images obtenues dans la partie visible et infrarouge du spectre électromagnétique. Ces différences font que, les données radars et les données obtenues dans le visible peuvent être complémentaires puisqu'elles offrent différentes perspectives de la surface de la Terre et apportent donc des informations différentes. Nous allons examiner plus en détail quelques-unes de ces propriétés et différences fondamentales des radars dans les prochaines sections.

Avant d'entrer dans les détails spécifiques aux radars, regardons brièvement l'origine et l'histoire de l'imagerie radar, et particulièrement les expériences canadiennes en télédétection radar. La première expérience réussie d'une transmission d'hyperfréquences et de réflexion par différents objets fut réalisée par Hertz, en 1886. Au début du 20^e siècle, on a développé les premiers radars rudimentaires pour la détection de navires. Dans les années 1920 à 1930, des radars au sol à impulsions expérimentaux ont été développés pour la détection d'objets éloignés. Les premiers radars utilisés pendant la Deuxième Guerre Mondiale avaient un étalage rotatif et étaient utilisés pour la détection et le positionnement des avions et des navires. Après la guerre, le radar aéroporté à antenne latérale (RAAL) a été développé par les militaires pour la reconnaissance et la surveillance des terrains. On utilisait alors un radar aéroporté qui imageait une bande de terrain parallèle au vol de l'avion. Au cours des années 50, les militaires ont amélioré les RAAL et ont développé le radar à synthèse d'ouverture (RSO) à grande résolution. Dans les années 60, ces radars ont été rendus disponibles pour les applications civiles et ont commencé à être utilisés pour des applications de cartographie civile. Depuis, le développement de plusieurs systèmes de radars aéroportés et spatioportés pour des applications de cartographie et de surveillance s'est poursuivi.

Le Canada a commencé à s'intéresser à la télédétection par radar au milieu des années 70. On a alors commencé à percevoir le potentiel que pouvaient représenter les radars pour la surveillance des vastes étendues nordiques souvent couvertes de nuages et cachées sous les ténèbres durant l'hiver arctique, ainsi que pour la surveillance et la cartographie des ressources naturelles. Le Canada a participé au projet SURSAT (Surveillance Satellite) de 1977 à 1979, qui a tracé la voie à sa participation au programme du satellite radar américain SEASAT, le premier satellite radar civil. Suite au programme SURSAT, le programme de

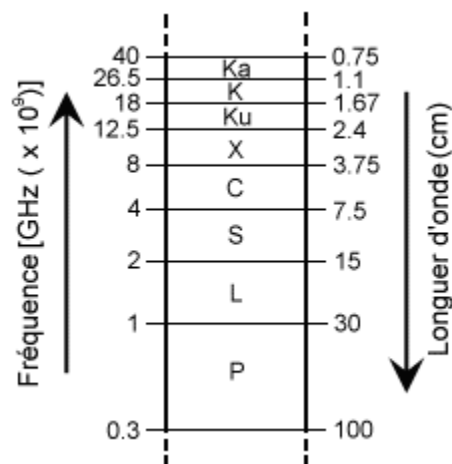
radar aéroporté Convair-580 du Centre canadien de télédétection en collaboration avec les programmes de recherche d'autres agences telles que la NASA et l'Agence Spatiale Européenne (ASE), a conclu en la faisabilité de la télédétection à partir de satellites. En 1987, le gouvernement canadien a instauré le programme de développement de données radar (PDDR) avec pour objectif de rendre accessibles aux Canadiens l'utilisation des données radars. Durant les années 80 et au début des années 90, plusieurs systèmes radar aéroportés de recherche et commerciaux ont acquis de vastes quantités d'images tout autour du globe. Ces expériences ont démontré l'utilité des données radar pour une vaste gamme d'applications. Avec le lancement du satellite ERS-1 de l'ASE en 1991, les recherches dans le domaine des radars spatioportés se sont intensifiées. Elles ont été suivies en 1992 par le lancement du satellite japonais J-ERS et en 1995 par les lancements du satellite ERS-2 et du satellite canadien RADARSAT.

3.2 Principes de base des radars



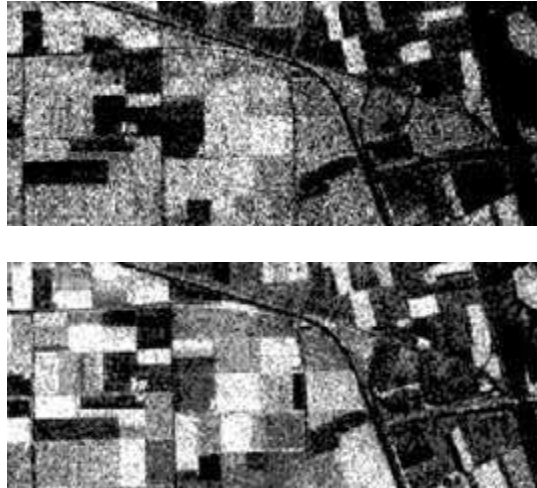
Comme nous l'avons mentionné dans la section précédente, un **radar** est essentiellement un instrument mesurant des distances. Il consiste en un émetteur, un récepteur, une antenne et un système électronique pour traiter et enregistrer les données. L'émetteur génère de courtes **impulsions** d'hyperfréquences (A) à intervalle régulier qui sont concentrées en un faisceau (B) par l'antenne. Le faisceau radar illumine latéralement la surface à angle droit par rapport au déplacement de la plate-forme. L'antenne reçoit une partie de l'énergie réfléchi (**rétrodiffusée**) par différents objets illuminés par le faisceau (C). En mesurant le délai entre la transmission et la réception de l'impulsion rétrodiffusée par les différentes cibles que les radars illuminent, on peut déterminer leur distance au radar, donc leur position. À mesure que le capteur se déplace, l'enregistrement et le traitement du signal rétrodiffusé construisent une image en deux dimensions de la surface illuminée par les hyperfréquences.

Bien que nous ayons caractérisé le rayonnement électromagnétique dans les parties visible et infrarouge du spectre électromagnétique principalement en fonction de leurs longueurs d'onde, le rayonnement des hyperfréquences est, quant à lui, caractérisé par les fréquences et les longueurs d'onde. Le domaine des hyperfréquences est beaucoup plus large que le domaine du visible et de l'infrarouge. Les bandes d'hyperfréquences les plus utilisées sont toujours identifiées par des lettres qui leur ont été attribuées lors de la Deuxième Guerre Mondiale. En voici un aperçu :



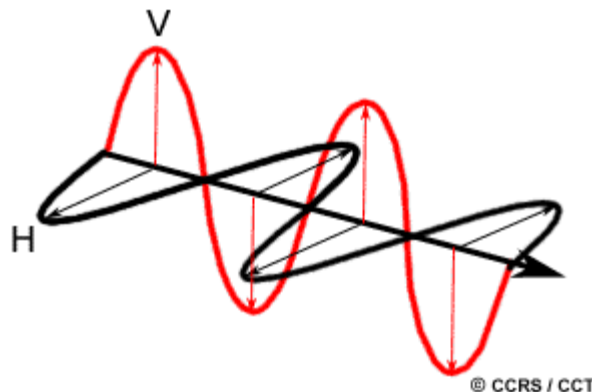
- Bandes Ka, K et Ku : très petites longueurs d'onde, utilisées dans les premiers radars aéroportés, très peu utilisées de nos jours.
- Bande X : très utilisée dans les systèmes radars aéroportés pour la reconnaissance militaire et la cartographie.
- Bande C : répandue dans plusieurs systèmes de recherche aéroportés (le Convair-580 du CCT, le AirSAR de la NASA) et spatioportés (ERS-1 et 2 ainsi que RADARSAT).

- Bande S : utilisée par le satellite russe ALMAZ.
- Bande L : utilisée par le satellite américain SEASAT et le satellite japonais JERS-1, ainsi que dans le système aéroporté de la NASA.
- Bande P : la plus grande longueur d'onde radar, utilisée pour le système aéroporté expérimental de la NASA.



Deux images radars du même champ agricole

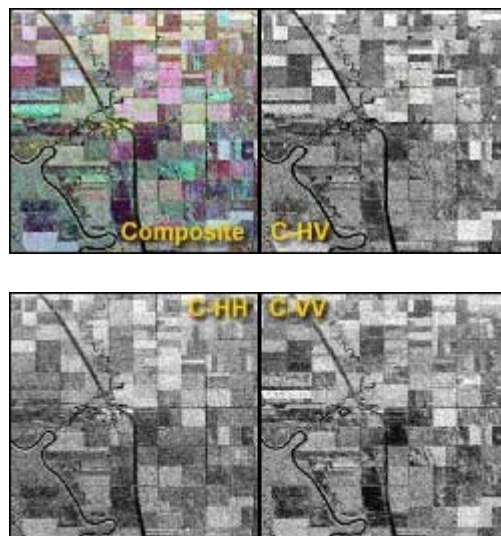
Voici deux images radars du même champ mais ayant été acquises avec une fréquence radar différente. L'image du haut a été acquise par un radar en bande C et celle du bas par un radar en bande L. On peut y observer des différences importantes dans l'apparence des différents champs et récoltes dans chacune des images. Ces différences sont dues aux différentes façons qu'a l'énergie radar d'interagir avec la végétation en fonction de la longueur d'onde. Nous aurons l'occasion d'approfondir ce sujet dans les prochaines sections.



La **polarisation** du rayonnement est un autre aspect important dans l'utilisation des hyperfréquences. La polarisation représente l'orientation du champ électromagnétique (ce dernier a été défini au chapitre 1). La plupart des radars ont été dessinés de façon à transmettre des hyperfréquences avec une polarisation horizontale (H) ou verticale (V). De même, l'antenne reçoit de l'énergie rétrodiffusée avec polarisation horizontale ou verticale, mais certains radars peuvent recevoir les deux. Il peut donc y avoir quatre combinaisons de polarisations de transmission et réception :

- HH polarisation horizontale pour la transmission et la réception
- VV polarisation verticale pour la transmission et la réception
- HV polarisation horizontale pour la transmission et verticale pour la réception
- VH polarisation verticale pour la transmission et horizontale pour la réception.

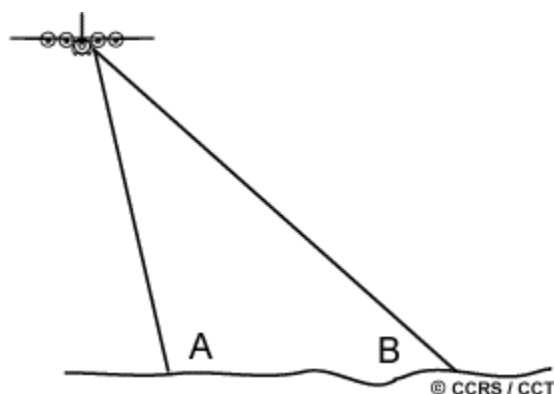
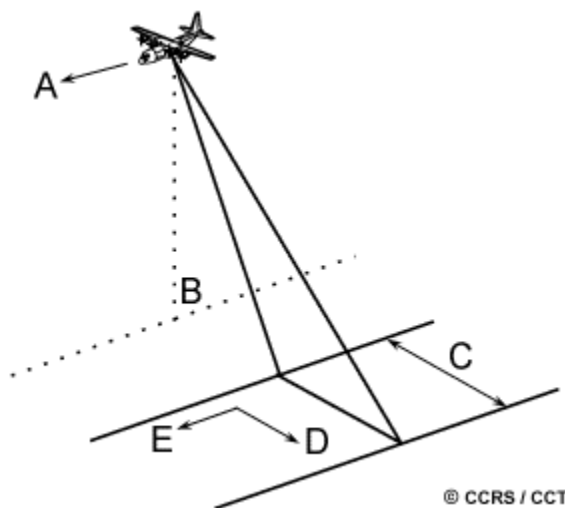
Les deux premières combinaisons sont appelées **polarisations parallèles** et les deux dernières **polarisations croisées**. Ces images de surfaces agricoles prises en bande C montrent la variation des résultats radars suite à des changements de polarisation. Les deux images du haut sont en polarisations parallèles, alors que celles du bas sont en polarisations croisées. L'image du coin gauche supérieur montre les trois types de polarisations, chacun étant représenté par une couleur primaire (rouge, vert et bleu). Tout comme pour les variations de longueurs d'onde, le type de polarisation à la transmission comme à la réception vont affecter l'interaction du rayonnement rétrodiffusé par la surface. Ainsi, une image radar acquise en utilisant diverses combinaisons de polarisation et de longueurs d'onde, peut procurer de l'information complémentaire sur les cibles.



Ces images en prises bande C

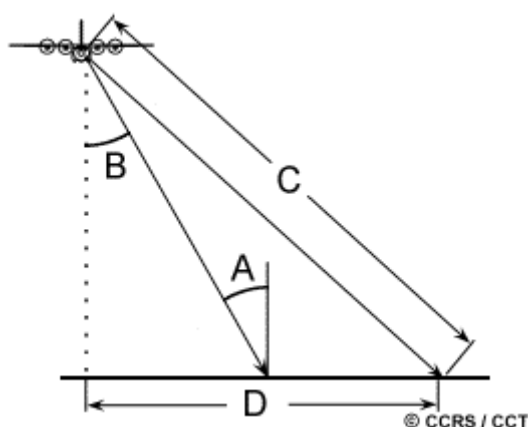
3.3 Géométrie de visée et résolution spatiale

La géométrie de visée d'un système radar diffère de celle des systèmes à découpage et à balayage employés pour la télédétection dans le visible que nous avons décrite au chapitre 2. Tout comme les systèmes opérant dans le visible, les plates-formes voyagent dans la **direction de vol** (A) avec le **nadir** (B) directement sous la plate-forme. Le faisceau d'hyperfréquences est transmis latéralement à angle droit par rapport au vol, illuminant un **couloir** (C) qui se trouve décalé par rapport au nadir. La **distance en portée** (D) est mesurée perpendiculairement au vol, alors que l'**azimut** (E) réfère à la dimension parallèle au vol. Cette vue latérale est une caractéristique de tous les radars aéroportés et spatioportés.



courte portée

La partie du couloir balayée la plus proche du nadir est appelée portée proximale (A), alors que la partie éloignée du nadir est appelée portée distale (B).

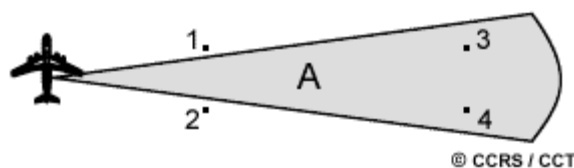
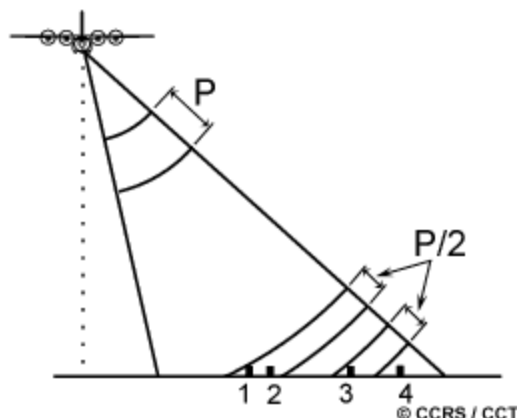


L'angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle entre le **faisceau du radar** et la **normale à la surface du sol** (A). L'angle d'incidence augmente graduellement de la portée proximale à la portée distale. L'**angle de visée** (B) est l'angle à partir duquel le radar illumine la surface. Dans la portée proximale, la géométrie de visée peut être considérée comme étant plus

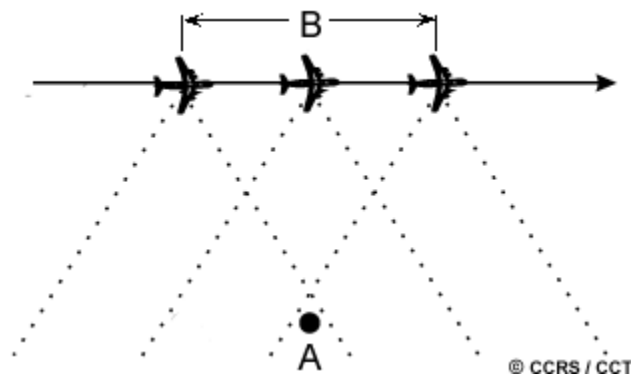
abrupte par rapport à la portée distale où la géométrie de visée est plus rasante. Pour tous les angles, l'antenne du radar mesure la distance radiale entre le radar et chaque cible sur la surface : c'est la **distance oblique** (ou distance-temps) (C). La **distance au sol** (D) est la vraie distance horizontale mesurée au sol, correspondant à chaque point mesuré dans la distance oblique.

Contrairement au cas des systèmes optiques, la résolution spatiale d'un radar varie en fonction des propriétés spécifiques du rayonnement des hyperfréquences et des effets géométriques. Dans le cas où l'on utilise un radar à ouverture réelle (ROR) (utilisé comme radar à visée latérale) pour former une image, une simple impulsion et sa rétrodiffusion servent à former l'image. Dans ce cas, la résolution dépend de la durée de cette impulsion dans le plan de la distance-temps et de la largeur de l'illumination dans la direction azimutale. La résolution transversale dépend de la durée de l'impulsion (P). Deux cibles distinctes sur la surface vont être différenciées dans la dimension transversale si leur séparation est plus grande que la moitié de la longueur d'onde de l'impulsion. Par exemple, les cibles 1 et 2 ne sont pas discernables, alors que les cibles 3 et 4 le sont. La résolution en distance-temps reste constante. Toutefois, lorsqu'elle est projetée en distance-sol, la résolution dépend de l'angle d'incidence. La résolution en distance-sol décroît lorsque la portée augmente.



La résolution azimutale ou longitudinale est déterminée par la largeur angulaire du faisceau d'hyperfréquences et par la distance en portée mesurée en distance-temps. La **largeur du faisceau** (A) est une mesure de la largeur du diagramme d'illumination. Au fur et à mesure que la distance en portée augmente, la résolution azimutale augmente (devient plus grossière). Sur cette figure, les cibles 1 et 2 à la portée proximale sont discernables, mais les cibles 3 et 4 plus éloignées (portée distale) ne le sont pas. La largeur du faisceau est inversement proportionnelle à la longueur de l'antenne (aussi appelée ouverture), donc une antenne longue produira un faisceau plus mince et une meilleure résolution.

De meilleures résolutions transversales sont possibles en utilisant deux petites impulsions, réalisables à l'intérieur de certaines restrictions de conception. De meilleures résolutions azimutales peuvent être obtenues en augmentant la longueur de l'antenne. Cependant, la longueur de l'antenne est soumise aux limites de chargement des plates-formes aériennes ou spatiales. Pour les radars aéroportés, les antennes sont généralement limitées à un ou deux mètres, tandis que pour les radars spatioportés, elles peuvent atteindre de 10 à 15 mètres de long. Pour contrer cette limitation, le mouvement avant de la plate-forme ainsi que des enregistrements et traitements spéciaux des échos rétrodiffusés sont utilisés pour simuler une plus longue antenne et augmenter ainsi la résolution azimutale.

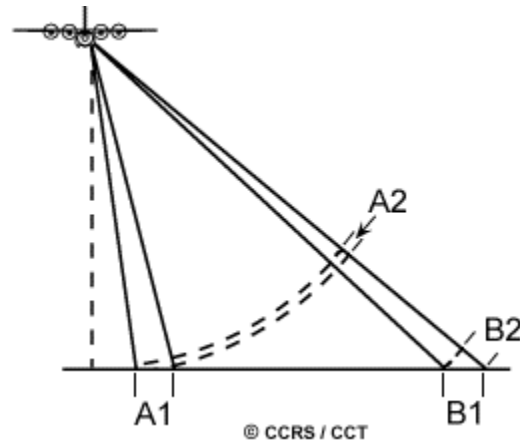


Cette figure illustre ce procédé. À mesure que la cible (A) se trouve devant le faisceau du radar, des échos rétrodiffusés provenant de chaque impulsion transmise commencent à s'enregistrer. À mesure que la plate-forme avance, tous les échos provenant de la cible pour chaque impulsion sont enregistrés pour la durée du passage de la cible devant le faisceau. Le moment où la cible quitte le champ du faisceau (2) détermine la longueur de l'antenne **synthétique** simulée (B). Les cibles, dans la longue portée où le faisceau est le plus large, vont être illuminées plus longtemps que celles pour les cibles dans la courte portée. L'élargissement du faisceau et l'augmentation de la période durant laquelle la cible se retrouve devant le faisceau pendant que la distance au sol augmente, s'équilibrent de manière à ce que la résolution demeure constante au travers du couloir tout entier. Cette méthode, utilisée pour obtenir une meilleure résolution azimutale dans le couloir entier, est appelée radar à synthèse d'ouverture ou RSO. La plupart des radars aéroportés et spatioportés utilisés de nos jours font appel à cette technique.

3.4 Distorsion des images radar

Comme c'est le cas pour tous les systèmes de télédétection, la géométrie de visée d'un radar cause une certaine distorsion de l'image résultante. Cependant, il existe des différences essentielles pour l'imagerie radar, dues à la géométrie de visée latérale et au fait que le radar est fondamentalement un instrument mesurant une distance (c'est-à-dire un instrument de télémétrie).

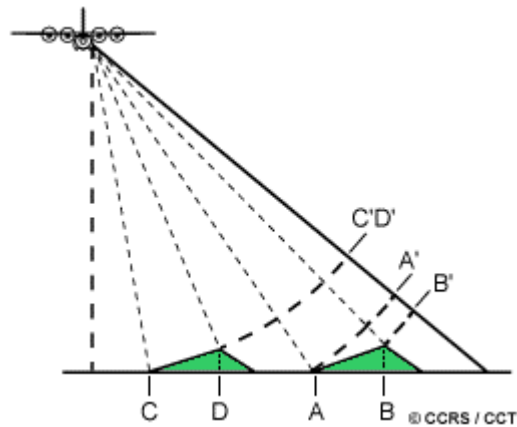
La distorsion due à l'échelle oblique se produit parce que le radar mesure la distance des objets obliquement au lieu de mesurer la vraie distance horizontale au sol. Cela résulte en des variations d'échelle de la portée proximale à la portée distale. Bien que les cibles A1 et B1 soient physiquement de la même grandeur, leurs dimensions paraissent différentes dans la portée proximale (A2 et B2). Les cibles dans la portée proximale paraissent comprimées par rapport à celles de la portée distale. À l'aide de fonctions trigonométriques, la distance au sol peut être calculée à partir de la distance oblique et de l'altitude de la plate-forme. Cette comparaison de conversion montre une image radar en distance oblique (en haut), où les champs et les routes de la portée proximale (du côté gauche de l'image) sont comprimées, et la même image convertie en distance au sol (en bas) avec les structures dans leur forme géométrique correcte.



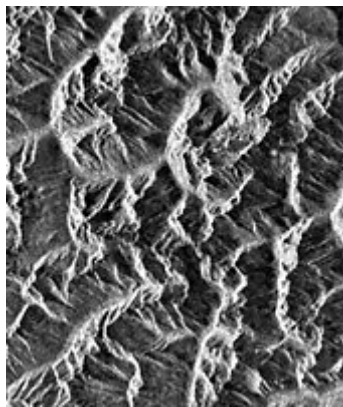
une image radar dans la distance oblique

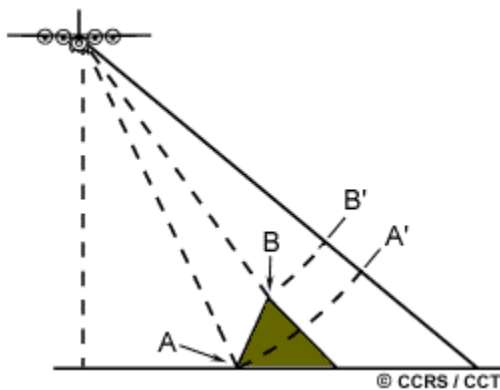
Comme pour les distorsions discutées dans le cas de l'imagerie obtenue avec des caméras et des balayeurs, les images radars montrent des distorsions géométriques dues au **déplacement du relief**. Tout comme pour l'imagerie produite par les balayeurs, ce déplacement est unidimensionnel et perpendiculaire à la direction du vol. Cependant, ce déplacement s'effectue vers le capteur plutôt qu'en s'en éloignant. Ce **déplacement du relief**

(ou repliement) existe sous deux formes :

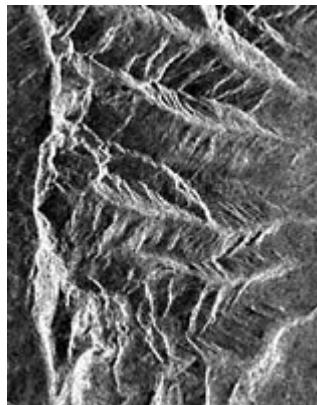


Quand le faisceau radar atteint la base d'une grande structure inclinée vers le radar (par exemple une montagne) avant d'atteindre son sommet, il peut se produire du repliement (foreshortening). Ici encore, puisque le radar mesure les distances obliques, la pente (A vers B) apparaîtra comprimée et la longueur de la pente sera incorrectement représentée (A' vers B'). L'importance du repliement variera selon l'angle de la pente de la montagne, en relation avec l'angle d'incidence du faisceau. Un maximum de repliement se produit quand le faisceau radar est perpendiculaire à la pente, de manière à ce que la pente, la base et le sommet soient vus simultanément (C à D). La longueur de la pente sera réduite à une longueur effective de zéro dans la distance oblique (C' à D'). Cette figure montre une image radar d'un terrain montagneux abrupt avec un repliement important. Les pentes repliées apparaissent plus brillantes sur l'image.

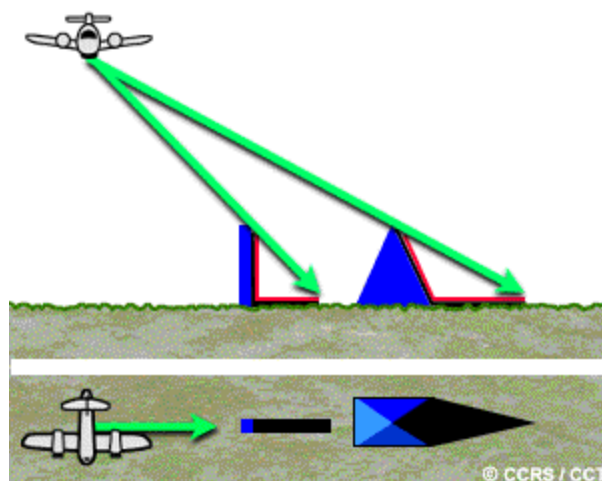




Un autre type de repliement (layover) se produit quand le faisceau radar atteint le sommet d'une cible élevée (B) avant d'atteindre sa base (A). Le signal de retour du sommet de la cible sera reçu avant le signal de la base. Il en résulte un déplacement vers le radar du sommet de la formation par rapport à sa vraie position au sol, ce qui a pour effet de le replier sur sa base (B' à A'). L'effet layover sur une image radar ressemble beaucoup à l'effet de repliement foreshortening. Comme pour le foreshortening, le layover est plus important pour de petits angles d'incidence, dans la portée proximale du couloir, et en terrain montagneux.



Les deux effets de repliement "foreshortening" et "layover" provoquent des ombres radars. Ces ombres se produisent lorsque le faisceau n'est pas capable d'illuminer la surface du sol. Des ombres apparaissent dans la portée distale du couloir, derrière les formations verticales ou les pentes raides. Puisque le faisceau radar n'illumine pas la surface, les régions ombragées apparaîtront plus sombres sur une image car il n'y a pas d'énergie disponible pour la rétrodiffusion. À mesure que l'angle d'incidence augmente de la portée proximale à la portée distale, l'effet d'ombre augmentera suivant le faisceau radar qui illumine la surface de façon de plus en plus oblique. Cette image illustre l'effet d'ombrage radar sur le côté droit d'une colline illuminée par la gauche.



Les surfaces rouges sont complètement dans l'ombre. Les zones noires dans l'image sont ombragées et ne contiennent aucune information.

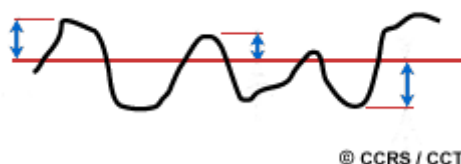


L'effet d'ombrage radar sur le côté droit d'une colline illuminée par la gauche

3.5 Interaction avec la cible et apparence de l'image

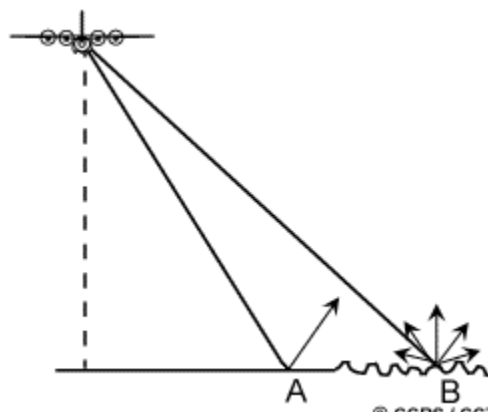
La brillance d'un élément sur une image radar est fonction de la portion de l'énergie transmise qui retourne au radar à partir de la cible à la surface. La magnitude de l'intensité de cette énergie rétrodiffusée dépend de la manière dont l'énergie radar interagit avec la surface, en fonction de plusieurs variables ou paramètres. Ces paramètres incluent les caractéristiques particulières des systèmes radars (fréquence, polarisation, géométrie de visée, etc.) ainsi que les caractéristiques de la surface (type de couverture, topographie, relief, etc.). Puisque plusieurs de ces caractéristiques sont interreliées, il est impossible de séparer leurs contributions individuelles à l'apparence des éléments sur les images radars. Des variations de ces paramètres peuvent avoir un impact sur les résultats et peuvent influencer les autres paramètres, affectant la quantité rétrodiffusée. Ainsi, la brillance d'un élément sur une image radar est habituellement une combinaison de plusieurs de ces variables. Mais, pour les besoins de notre discussion, nous pouvons regrouper ces caractéristiques en trois catégories qui contrôlent fondamentalement l'interaction énergie/cible des radars. Ces catégories sont :

- rugosité de la surface de la cible
- relation entre la géométrie de visée du radar et de la surface
- le taux d'humidité et les propriétés électriques de la cible.

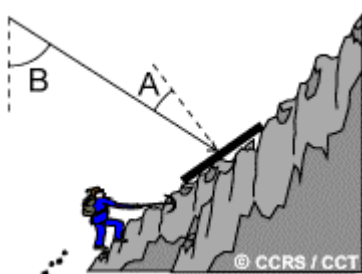


La rugosité de la surface d'une structure contrôle la manière dont les hyperfréquences interagissent avec cette surface ou la cible, ce qui est généralement le facteur dominant dans la détermination d'une image radar. La rugosité se définit comme la variation moyenne des aspérités de la surface par rapport à une surface plane. Elle se mesure en centimètres. L'apparence rugueuse ou lisse d'une surface dépend de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence.

Une surface est considérée "lisse" si la variation verticale est beaucoup plus petite que la longueur d'onde du radar. Lorsque la variation verticale est de l'ordre de la longueur d'onde, la surface apparaît rugueuse. Donc, une surface donnée apparaît plus rugueuse lorsque la longueur d'onde diminue, et plus douce lorsque la longueur d'onde augmente. Une surface lisse (A) engendre une réflexion **spéculaire** de l'énergie incidente (généralement dans la direction opposée au capteur) et en conséquence, seule une



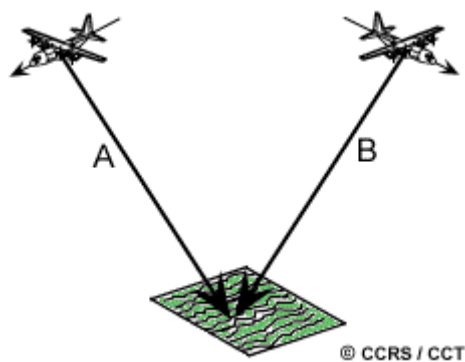
petite quantité d'énergie retourne au radar. Les surfaces lisses apparaissent comme des régions en tons plus sombres sur une image. Une surface rugueuse (B) réfléchira l'énergie dans toutes les directions (il y aura **diffusion**), et une partie importante de l'énergie sera rétrodiffusée vers le radar. Les surfaces rugueuses apparaîtront donc en tons plus clairs sur une image. L'angle d'incidence, en combinaison avec la longueur d'onde, joue aussi un rôle important dans la rugosité apparente d'une surface. Pour une longueur d'onde et une surface données, la surface apparaîtra plus lisse à mesure que l'angle d'incidence augmente. Donc, en s'éloignant à travers le couloir de la portée proximale à la portée distale, une moins grande quantité d'énergie retournera au capteur et l'image sera plus sombre.



Nous avons déjà abordé la relation existant entre l'angle d'incidence et la géométrie de visée et de la manière dont les changements de cet angle affectent le signal retourné au radar. Cependant, pour comprendre la relation entre la surface (géométrie, rugosité et humidité) et la tonalité de l'image, l'utilisation de l'angle d'incidence local est plus appropriée.

L'angle d'incidence local se définit comme étant l'angle mesuré entre le faisceau radar et la normale à la pente au point d'incidence (A). Ainsi, l'angle d'incidence local tient compte de la pente locale du terrain par rapport au faisceau du radar. Pour un terrain plat, l'angle d'incidence local est identique à l'angle de visée (B) du radar, ce qui n'est pas le cas en terrain accidenté. En général, les pentes faisant face au radar auront un petit angle d'incidence local causant un fort signal rétrodiffusé vers le capteur, ce qui résulte en une tonalité plus brillante sur l'image radar.

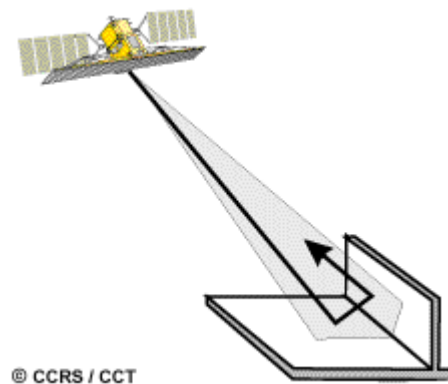
Comme le démontre le concept de l'angle d'incidence local, la relation entre la géométrie de visée et de surface joue un rôle important dans la manière dont l'énergie interagit avec les cibles et leur brillance sur une image. Des variations dans la géométrie de visée accentueront et augmenteront la topographie et le relief de différentes manières, comme par exemple, divers degrés de repliement ou d'ombrage (section 3.4) peuvent se produire selon la pente de la surface, son orientation ou sa forme.



La direction de visée du radar décrit l'orientation du faisceau radar par rapport à la direction ou l'alignement des éléments de la surface. La direction de visée peut influencer d'une

manière significative l'apparence des éléments sur une image radar, surtout les grands éléments linéaires (tels que des champs de culture ou des chaînes de montagnes). Si la direction de visée est presque perpendiculaire à l'orientation de la structure (A), une large portion de l'énergie incidente sera réfléchi vers le capteur et cette structure apparaîtra en tons plus brillants. Si la direction de visée est plus oblique par rapport à l'orientation de l'élément (B), une moins grande quantité d'énergie sera retournée au radar et cet élément apparaîtra en tons plus sombres. La direction de visée est importante pour augmenter le contraste entre les différents éléments sur une image. Il est important d'avoir la bonne direction de visée dans les régions montagneuses afin de minimiser le repliement et l'ombrage. L'acquisition d'images provenant de directions de visée différentes peut améliorer l'identification des éléments à l'aide de différentes orientations relatives au radar.

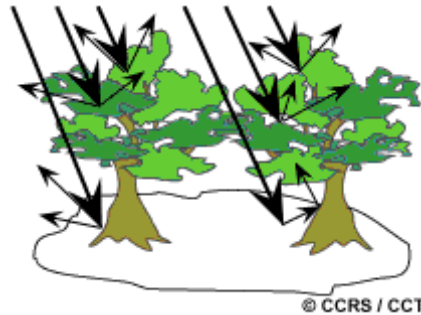
Les éléments qui ont des surfaces plutôt lisses formant un ou plusieurs angles droits, peuvent former un réflecteur en coin si les coins font face à la direction générale de l'antenne du radar. Une surface à angle droit force l'énergie du radar à être rétrodiffusée directement vers l'antenne à cause d'une double (ou multiple) réflexion. Les réflecteurs en coin aux formes angulaires complexes sont fréquents en zone urbaine (par exemple les bâtiments et les rues, les ponts et autres structures fabriquées par les humains). Des réflecteurs en coin naturels peuvent aussi exister, tels que des amas de roches, des falaises ou de la végétation croissant verticalement dans l'eau. Dans tous les cas, les réflecteurs en coin demeurent des cibles brillantes sur une image, tels les bâtiments et les autres structures faites par l'homme dans cette image radar d'une ville.



La présence (ou l'absence) d'effets d'humidité change les propriétés électriques d'un objet ou du médium. Des changements des propriétés électriques influencent l'absorption, la transmission et la réflexion de l'énergie des hyperfréquences. Donc, le taux d'humidité influencera la façon dont les cibles et les surfaces réfléchissent l'énergie provenant d'un radar, ainsi que leur apparence sur une image. En général, la réflectivité et la brillance d'une image s'accroissent avec l'augmentation du taux d'humidité. Par exemple, les surfaces telles

que le sol et les couvertures végétales apparaîtront plus brillantes mouillées que sèches.

Quand une cible est mouillée, la diffusion provenant de sa partie supérieure (**diffusion de surface**) est le procédé de diffusion dominant. Le genre de réflexion (allant de spéculaire à diffuse) et la magnitude dépendent de la rugosité apparente du matériel balayé par le radar. Si la cible est très sèche et que la surface semble lisse, l'énergie radar peut être capable de pénétrer sous la surface, selon qu'elle soit discontinue (forêt avec feuilles et branches) ou continue (sol, sable ou glace). Pour une surface donnée, les longueurs d'onde plus longues peuvent pénétrer plus profondément que les longueurs d'onde plus courtes.

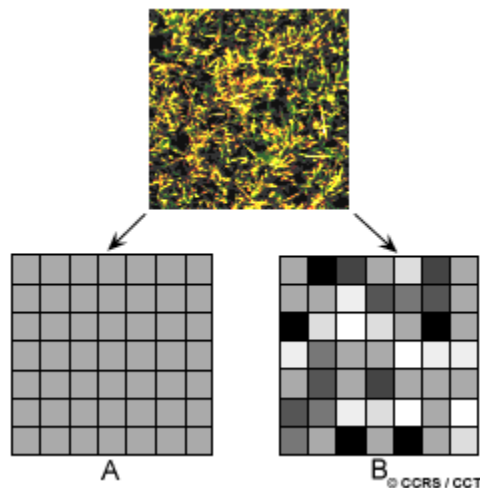


Si l'énergie radar réussit à pénétrer à travers la partie supérieure de la surface, il se produit un phénomène de diffusion volumique. L'énergie radar diffusée dans un volume ou médium est constituée de réflexions provenant des différentes composantes (ou des diverses couches) à l'intérieur du volume. Par exemple, dans une forêt, la diffusion peut provenir des feuilles au sommet des arbres, des autres feuilles et des branches en dessous, ainsi que des troncs et du sol. Une diffusion volumique augmente ou diminue la brillance d'une image, selon la quantité d'énergie diffusée à l'extérieur du volume en direction du radar.

3.6 Propriétés des images radars



Toutes les images radars contiennent une certaine quantité de ce que l'on appelle le **chatoiement radar**. Cet effet se manifeste comme une texture poivre et sel sur les images. Le chatoiement est produit par l'interférence aléatoire, constructive et destructive, provenant de la diffusion multiple qui se produit dans chaque cellule de résolution. Par exemple, sans l'effet de chatoiement une cible homogène (comme une grande étendue de gazon) apparaîtrait en tons plus clairs (A). Mais la réflexion provenant de chaque brin d'herbe à l'intérieur de chaque cellule de résolution produit des pixels plus clairs et d'autres plus sombres que la moyenne (B), de sorte que le champ apparaît tacheté.



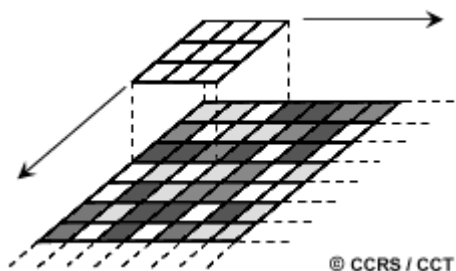
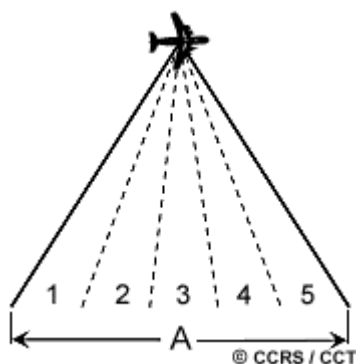
Le chatoiement est essentiellement une sorte de bruit qui dégrade la qualité de l'image et peut rendre l'interprétation (visuelle ou numérique) plus difficile. Ainsi, il est généralement préférable de réduire le chatoiement avant l'interprétation et l'analyse des images. Deux techniques permettent de **réduire le chatoiement** :

- le traitement multi-visée
- le filtrage spatial.

Le traitement multi-visée consiste en l'acquisition de plusieurs images distinctes d'une même scène (cinq images dans cet exemple). Comme le suggère le nom de ce traitement, chaque visée produit sa propre image de la scène illuminée.

Chacune de ces images est aussi sujette au phénomène de chatoiement, mais en faisant la

moyenne de toutes les images pour obtenir une image finale, on réduit l'effet de chatoiement.



Le traitement multi-visée est habituellement effectué lors de l'acquisition des données. Par contre, la réduction du chatoiement par filtrage spatial se fait numériquement sur l'image au moyen d'un ordinateur. La réduction du chatoiement par filtrage consiste à extraire une fenêtre de quelques pixels (ex. : 3 sur 3 ou 5 sur 5) au-dessus de chaque pixel de l'image. Le filtrage est effectué en appliquant un calcul utilisant la valeur des pixels de la

fenêtre (par exemple en calculant la moyenne des valeurs) et en remplaçant le pixel correspondant de l'image résultante par le résultat de l'opération mathématique. La fenêtre est déplacée un pixel à la fois, dans les rangées et les colonnes, jusqu'à ce que l'image entière soit couverte. En calculant la moyenne d'une petite fenêtre autour de chaque pixel, on obtient un effet de lissage qui réduit le chatoiement. Ce graphique montre une image radar avant (en haut) et après (en bas) la réduction du chatoiement par le filtre moyen. La valeur médiane de tous les pixels sous la fenêtre est aussi utilisée pour réduire le chatoiement. D'autres méthodes de filtrage plus complexes peuvent être utilisées pour réduire le chatoiement, tout en minimisant l'effet de lissage des données.

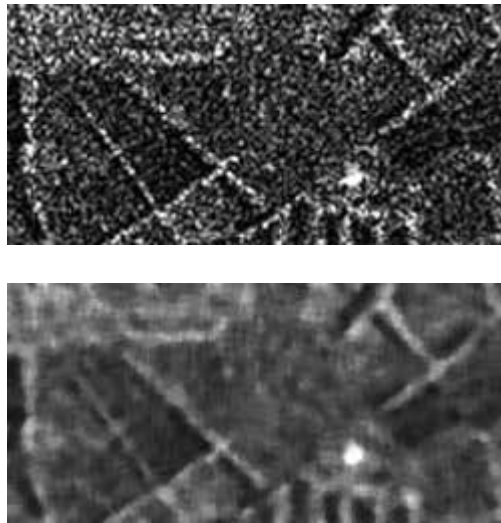


Image radar avant (en haut) et après (en bas) la réduction des taches par le filtre moyen

Le procédé multi-visée et le filtrage spatial réduisent tous deux le chatoiement radar, puisqu'ils lissent l'image. L'application spécifique prévue pour l'image et le degré de détail désiré déterminera donc le niveau de réduction du chatoiement nécessaire. Si l'application requiert des détails fins et une haute résolution, le traitement multi-visée ou le filtrage spatial ne sont pas très appropriés. Par contre, si on désire une image à basse résolution pour une application en cartographie par exemple, alors la réduction du chatoiement peut être tout à fait indiquée.

La distorsion oblique que nous avons définie à la section 3.4 constitue une autre propriété particulière des images radars. Les éléments dans la portée proximale sont comprimés par rapport à ceux qui sont présents dans la portée distale à cause de la non-linéarité de l'échelle des distances. Pour la plupart des applications, il est préférable que l'image radar soit dans un format qui corrige cette distorsion pour permettre le calcul des vraies distances entre les éléments. Ceci requiert une conversion de l'image en distance-sol. Cette conversion peut être faite par le processeur radar lors du traitement des données, ou en transformant l'image. Dans la plupart des cas, cette conversion ne sera qu'une estimation, à cause des complications introduites par la variation du relief et de la topographie.



Une antenne radar transmet plus d'énergie dans la partie centrale du couloir balayé que dans la portée proximale ou la portée distale. Cet effet est connu sous le nom de diagramme d'antenne et donne une rétrodiffusion plus forte en provenance de la partie centrale du couloir que des côtés. En plus de cet effet, l'énergie reçue décroît de façon significative avec la distance. Pour une surface donnée, l'intensité du signal rétrodiffusé diminue donc en avançant à travers le couloir. Ces effets se combinent pour produire une image dont l'intensité (teinte) varie de la portée proximale à la portée distale. Un procédé appelé **correction de diagramme d'antenne** peut s'appliquer pour produire une tonalité uniforme moyenne à travers le couloir pour faciliter l'interprétation visuelle. L'étendue des niveaux de brillance qu'un système de télédétection peut distinguer est liée à la résolution radiométrique (voir section 2.5) et est appelée **plage dynamique**. Alors que les capteurs optiques tels qu'utilisés dans les satellites LANDSAT et SPOT produisent 256 niveaux d'intensité, les systèmes radars peuvent différencier jusqu'à environ 100 000 niveaux! Puisque l'oeil humain ne peut percevoir simultanément qu'environ 40 niveaux d'intensité, il y a trop d'information pour l'interprétation visuelle. Même un ordinateur normal aurait de la difficulté avec cette quantité d'information. Ainsi donc, la plupart des radars enregistrent et transmettent les données originales en 16 bits (65 536 niveaux d'intensité) que l'on réduit à 8 bits (256 niveaux) pour l'interprétation visuelle et l'analyse par ordinateur.

L'**étalonnage** est un procédé qui assure que le système radar et le signal qu'il mesure soient aussi constants et précis que possible. La plupart des images radars requièrent un étalonnage relatif avant d'être analysées. Cet étalonnage corrige les variations connues de l'antenne et la réponse du système, et assure que des mesures uniformes et répétitives sont possibles. Cette opération permet d'effectuer en toute confiance des **comparaisons relatives** entre la réponse des éléments dans une même image, et entre d'autres images. Cependant, si on désire faire des mesures quantitatives précises, représentant l'énergie vraiment retournée par les différentes structures ou cibles pour des fins de comparaison, alors un **étalonnage absolu** est nécessaire.

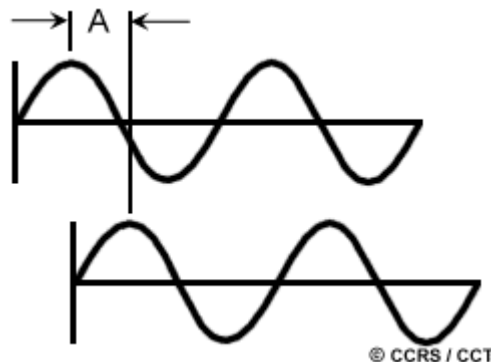
L'étalonnage absolu est un procédé beaucoup plus laborieux que l'étalonnage relatif. Il tente de relier la magnitude du signal enregistré avec la vraie valeur de l'énergie rétrodiffusée à partir de chaque cellule de résolution. Pour ce faire, des mesures détaillées des propriétés du système radar sont requises, ainsi que des mesures quantitatives au sol faites à l'aide de cibles calibrées (décrit dans la section 3.1). Aussi, des appareils appelés **transpondeurs** peuvent être placés au sol avant l'acquisition des données pour calibrer l'image. Ces appareils reçoivent le signal radar, l'amplifient et le retournent vers le radar avec une intensité déterminée. En connaissant l'intensité de ce signal dans l'image, la réponse des autres structures peut être trouvée par extrapolation.

3.7 Applications radars avancées



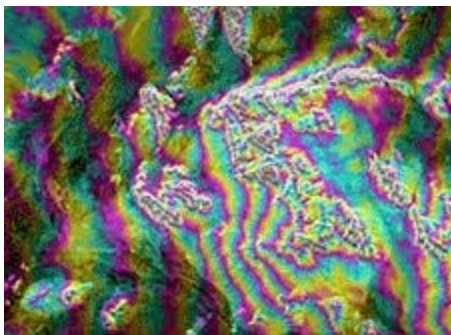
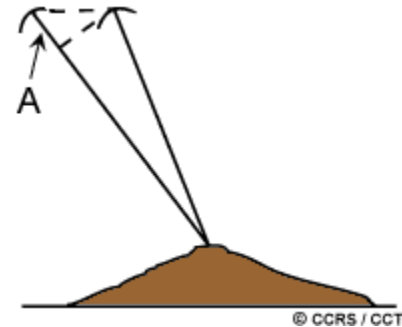
En plus de l'acquisition et de l'utilisation des données radars normales, il existe trois applications spécifiques qui méritent d'être mentionnées.

La première est le radar stéréoscopique qui est semblable au concept de cartographie stéréo utilisant la photographie aérienne (décrit dans la section 2.7). Des paires d'images radar stéréo sont obtenues de la même région, mais avec des angles de visée/incidence différents (A), ou de directions opposées (B). Contrairement aux photographies aériennes dans lesquelles le déplacement est radial en s'éloignant du nadir (directement sous la caméra), les images radars présentent un déplacement seulement dans la direction parallèle à la visée. Les paires stéréoscopiques prises de directions opposées (c'est-à-dire l'une regardant vers le nord et l'autre vers le sud) peuvent présenter des contrastes significatifs et être difficiles à interpréter visuellement ou numériquement. En terrain montagneux, cet effet sera encore plus prononcé puisque les ombres du côté opposé des structures élimineront l'effet stéréo. L'imagerie stéréoscopique prise du même côté (A) a été utilisée de façon effective depuis plusieurs années pour aider l'interprétation en foresterie et en géologie et aussi pour générer des cartes topographiques. L'évaluation des distances mesurées et de la hauteur du terrain pour la cartographie topographique à partir d'images radar stéréo est appelée **radargrammétrie** et est semblable à la photométrie utilisée à des fins similaires avec des photographies aériennes.

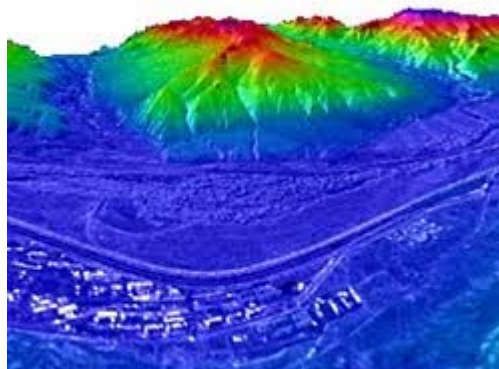


La radargrammétrie est une méthode d'évaluation par radar de la hauteur des surfaces. Une autre méthode plus avancée est l'**interférométrie**. L'interférométrie est possible grâce à

l'étude de la variation de la phase des ondes électromagnétiques. Supposons que nous ayons deux ondes de même longueur, mais que le point de départ de l'une d'entre elles soit décalé par rapport à l'autre. Le déplacement entre les points correspondants sur ces deux ondes (A) s'appelle la **différence de phase**. Les systèmes interférométriques utilisent deux antennes parallèles, séparées par une petite distance, qui enregistrent le signal de retour de chaque cellule de résolution. Les deux antennes peuvent être sur la même plate-forme (comme pour les systèmes spatioportés RSO), ou bien les données peuvent être obtenues avec le même capteur comme c'est le cas pour certains radars aéroportés ou spatioportés. En mesurant exactement la différence de phase entre deux **signaux rétrodiffusés** (A), la différence de leur longueur de parcours peut être calculée avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde (c'est-à-dire en centimètre). La position de l'antenne par rapport à la



surface de la Terre étant connue, l'on peut déterminer la position (et l'élévation) de la cellule de résolution. La différence de phase entre des cellules de résolution adjacentes est illustrée dans cet interférogramme, où les couleurs représentent la variation de la hauteur. L'information contenue dans un interférogramme peut être utilisée pour dériver de l'information topographique et produire de l'imagerie en trois dimensions de la hauteur des terrains.



Nous avons déjà fait allusion au concept de la **polarimétrie** radar dans notre discussion sur les principes de base des radars dans la section 3.2. Comme son nom le suggère, la polarimétrie étudie la discrimination entre les **polarisations** qu'un système radar peut émettre et recevoir. La plupart des radars transmettent du rayonnement dans les hyperfréquences avec une **polarisation horizontale** (H) ou **verticale** (V). De même, ils reçoivent le signal rétrodiffusé dans une seule de ces polarisations. Les radars à polarisations multiples sont capables de transmettre en polarisations H ou V, et peuvent recevoir en mode parallèle ou croisé (HH, HV, VH et VV, où la première lettre correspond à la polarisation de transmission

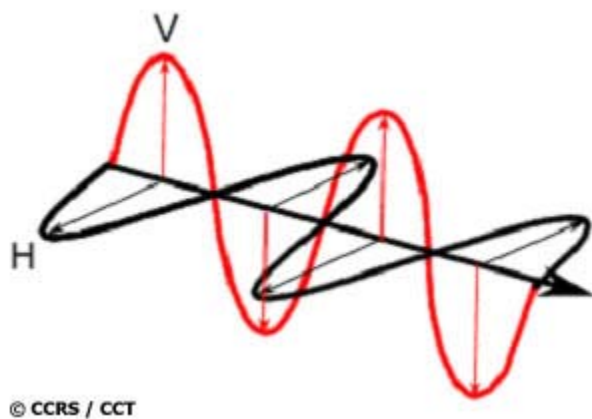
et la seconde à la polarisation de réception). Les **radars polarimétriques** sont capables de transmettre et de recevoir dans les modes horizontal et vertical. Ils sont donc capables de recevoir et de traiter les quatre combinaisons de polarisation : HH, HV, VH et VV. Chacun de ces canaux de polarisation a une sensibilité différente aux propriétés et caractéristiques de la surface. La disponibilité de données de polarisations multiples améliore donc l'identification et la discrimination entre les éléments. En plus d'enregistrer la magnitude (c'est-à-dire la force) du signal de retour pour chaque polarisation, la plupart des radars polarimétriques sont aussi capables d'enregistrer l'information sur la **phase** du signal de retour. La phase peut être utilisée pour mieux caractériser la signature polarimétrique des différents éléments de la surface.

3.8 La polarimétrie radar

Introduction à la polarisation

La polarisation du rayonnement représente une propriété essentielle de la propagation et de la diffusion des hyperfréquences. La polarisation d'une onde électromagnétique représente la position du vecteur champ électrique dans un plan perpendiculaire à la direction de la propagation. Tant que la longueur du vecteur représente l'**amplitude** et que la vitesse de rotation du vecteur correspond à la **fréquence** de l'onde, la polarisation est donnée par l'**orientation** et la forme du motif tracé par la pointe du vecteur.

La forme d'onde de la tension d'un champ électrique d'une onde électromagnétique peut être prédictive (l'onde est polarisée) ou aléatoire (l'onde est non polarisée), ou une combinaison des deux. Dans le dernier cas, le degré de polarisation exprime le rapport entre la puissance polarisée et la puissance totale de l'onde. Par exemple, une onde sinusoïdale **monochromatique** ayant une fréquence constante et une amplitude stable représente une onde entièrement polarisée



Exemples de polarisations horizontales (noir) et verticales (rouge) d'une onde électromagnétique.

De nombreux radars sont conçus de manière à transmettre le rayonnement des hyperfréquences en polarisation horizontale (H) ou verticale (V). Cette onde transmise, qu'elle soit en polarisation H ou V, peut générer une onde rétrodiffusée avec différentes polarisations. On appelle polarimétrie radar la technique d'analyse de la combinaison de ces polarisations.

On peut combiner les polarisations des ondes transmises et reçues en utilisant les paramètres H et V dont l'interrelation est bien définie. C'est pourquoi les systèmes qui transmettent et reçoivent ces deux polarisations linéaires sont couramment utilisés. Avec ce type de radar, il existe quatre combinaisons de polarisations de transmission-réception :

- HH - transmission et réception horizontales

- VV - transmission et réception verticales
- HV - transmission horizontale et réception verticale, et
- VH - transmission verticale et réception horizontale.

Pour les deux premières combinaisons de polarisation, on parle de « polarisation parallèle » puisque les polarisations de transmission-réception **sont les mêmes**. En revanche, on parle de « polarisation croisée » pour les deux dernières combinaisons, car les polarisations de transmission-réception **sont orthogonales** l'une par rapport à l'autre.

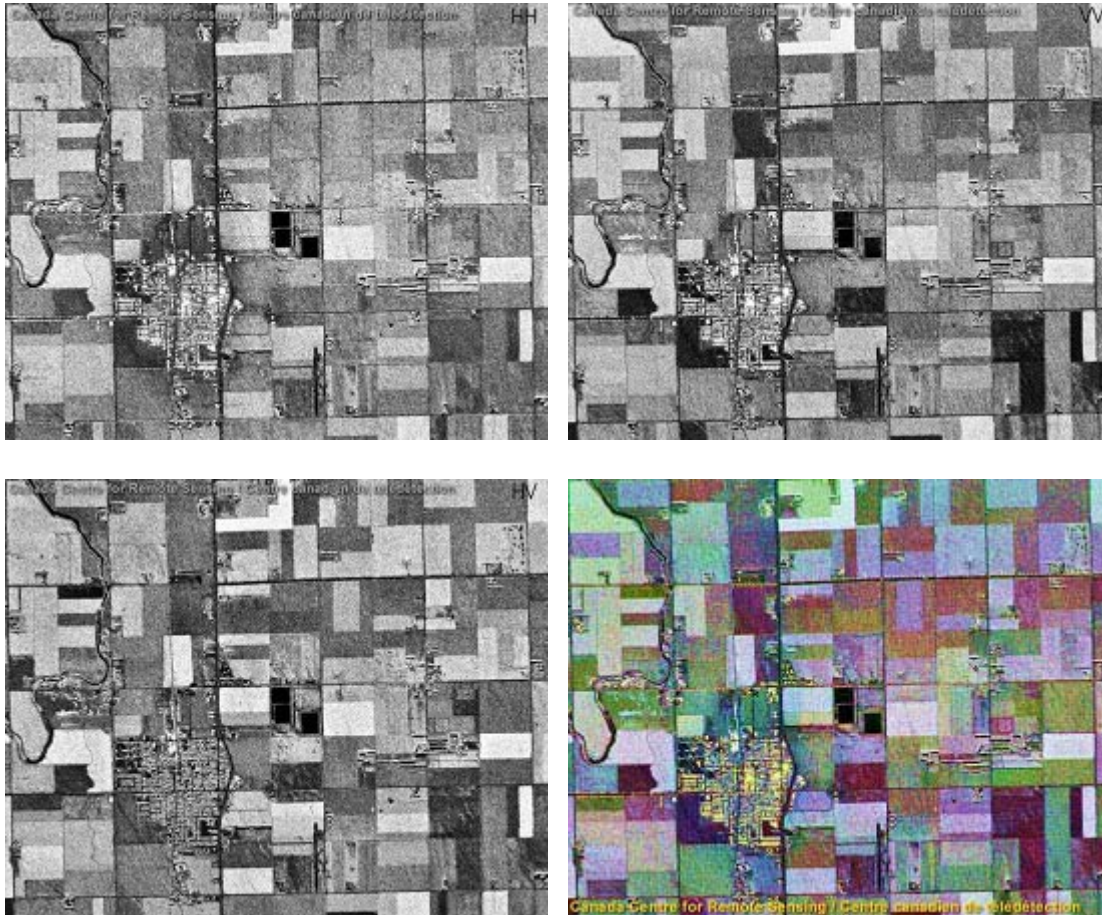
Les systèmes radars peuvent comprendre une, deux et même quatre combinaisons de polarisations de transmission-réception. Voici des exemples de systèmes radars :

Polarisation simple	- HH ou VV (éventuellement HV ou VH)
Bipolarisation	- HH et HV, VV et VH ou HH et VV
Polarisation alternée	- HH et HV alternant avec VV et VH
Polarimétrique	- HH, VV, HV et VH

On peut utiliser les termes « polarisation en quadrature » et « polarimétrie intégrale » comme synonymes de « polarimétrie ». La mesure de la **phase relative** entre les canaux constitue un paramètre très important pour un radar polarimétrique, alors qu'elle n'est pas obligatoirement mesurée pour les autres types de radar. On trouve sur le satellite ENVISAT un mode de polarisation alternée, pour lequel la phase relative est mesurée. Cependant, la phase principale HH-VV n'y a aucune signification en raison du délai entre les mesures.

Ces images en bande C des terres agricoles démontrent la corrélation entre la réponse radar et la polarisation. Les deux images supérieures ont été acquises en polarisation parallèle (HH celle de gauche, VV celle de droite), alors que l'image inférieure gauche a été acquise en polarisation croisée (HV). L'image inférieure droite est le résultat visuel d'un composé couleur de ces trois images (HH : rouge, VV : vert, HV : bleu).

Autant la longueur d'onde que la polarisation modifient la façon qu'un système radar « voit » les éléments d'une scène. Par conséquent, les images radar saisies à partir de diverses combinaisons de polarisation et de longueur d'onde peuvent fournir une information différente et complémentaire. De plus, la combinaison de trois polarisations dans un composé couleur permettra d'extraire de l'information supplémentaire sur les caractéristiques de surface.



Exemple d'accentuation de différents éléments d'une zone agricole à l'aide de diverses polarisations (HH, VV, HV et composé couleur).

Information polarimétrique

La matrice de diffusion décrit principalement comment les cibles radars ou les éléments à la surface diffusent l'énergie électromagnétique. On peut toutefois y dériver d'autres formes d'information polarimétrique, telles que les images synthétisées ou les signatures de polarisation.

Synthèse de polarisation

On peut utiliser deux polarisations orthogonales, généralement de transmission-réception linéaires H et V, d'un radar polarimétrique pour déterminer la réponse d'une cible ou la matrice de diffusion. Si l'on connaît la matrice de diffusion, on peut calculer la réponse de la cible pour **toutes les combinaisons** de polarisations de transmission-réception. Ce calcul qui illustre la puissance et la souplesse du radar à polarimétrie intégrale s'appelle **synthèse de polarisation**.

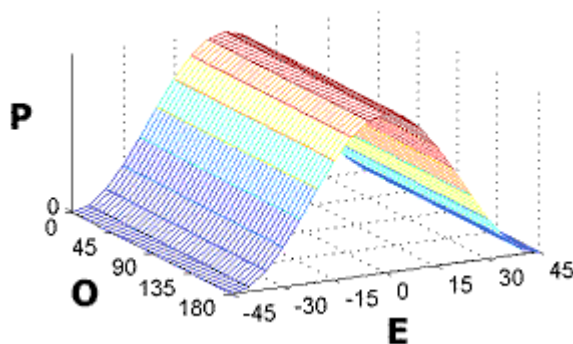
À l'aide de la synthèse de polarisation, on peut créer une image pour améliorer la détectabilité des éléments sélectionnés, par exemple la détection de navires dans l'océan. Pour trouver la meilleure combinaison de polarisations de transmission-réception, on calcule les signatures de polarisation d'un bateau et de l'océan pour diverses polarisations. Par la suite, on établit le rapport de rétrodiffusion entre le bateau et l'océan pour chaque polarisation. La combinaison de polarisations de transmission-réception qui maximise le rapport de puissance de rétrodiffusion est par la suite utilisée pour perfectionner la détectabilité des bateaux. On appelle cette procédure « accentuation du contraste polarimétrique » ou l'utilisation d'un « filtre polarimétrique adapté ».

Signatures de polarisation

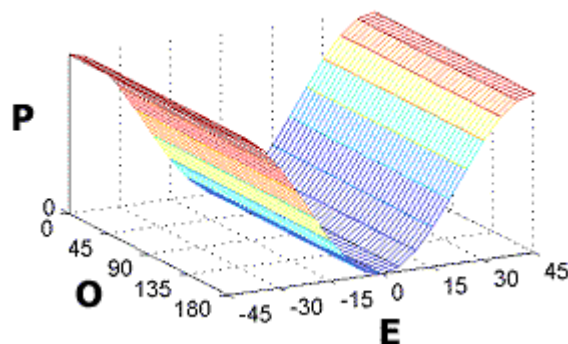
En raison des multiples polarisations des ondes incidentes et diffusées et des quatre nombres complexes de la matrice de diffusion, il vaut mieux simplifier l'interprétation du comportement de diffusion en utilisant un diagramme tridimensionnel qu'on appelle « signature de polarisation » ou « diagramme de réponse de polarisation ». Ce diagramme représente une façon pratique de visualiser les propriétés de diffusion d'une cible.

Les axes des x et des y de la signature de polarisation représentent les valeurs d'ellipticité (-45° à $+45^\circ$) et d'orientation (0 à 180°) du champ électrique de l'onde électromagnétique incidente, alors que l'axe des z exprime la valeur de la puissance de la rétrodiffusion. Cette dernière peut être calculée, pour chaque polarisation incidente possible, à partir d'une **même** polarisation de transmission-réception (signature de polarisation parallèle) et de polarisations **orthogonales** de transmission-réception (signature de polarisation croisée).

Signature de copolarisation



Signature à polarisation croisée



Signatures de polarisation d'une grande sphère de conduction.
P = Puissance, O = Orientation (degrés), E = Ellipticité (degrés)

Cette figure montre les signatures de polarisation de deux cibles élémentaires, une grande sphère de conduction et un réflecteur en coin trièdre. Pour ces cibles, la polarisation de l'onde

rétrodiffusée demeure la même que celle transmise, mais avec un changement de signe de l'ellipticité pour chaque réflexion (ou dans le cas d'une polarisation linéaire, un changement de l'angle de phase de 180° entre E_h et E_v). Par conséquent, la sphère et le réflecteur trièdre se comportent en réflecteur « impair », puisqu'ils produisent une et trois réflexions respectivement.

Pour les cibles plus complexes, la signature de polarisation se présente sous différentes formes. Le réflecteur en coin dièdre et la diffusion de Bragg à la surface de l'océan en représentent deux exemples intéressants. Dans le cas du réflecteur dièdre, la signature de polarisation parallèle montre deux pics qui caractérisent les réflecteurs « pairs ». Au contraire, la réponse de la diffusion de Bragg est similaire à la réflexion simple d'une sphère, à l'exception d'une valeur de rétrodiffusion de la polarisation verticale supérieure à celle de la polarisation horizontale.

Étalonnage des données

Pour les systèmes radars polarimétriques, il est essentiel d'effectuer un étalonnage des données, car l'information utilisée s'appuie sur les **rapports** d'amplitude et les **différences** dans les angles de phase des quatre combinaisons de polarisation de transmission-réception. Ainsi, un étalonnage imprécis entraînerait une mauvaise interprétation des mécanismes de diffusion, il n'y aurait donc aucun avantage à utiliser la polarisation.

L'étalonnage est effectué par la combinaison des paramètres du système radar et de l'analyse des données. Par exemple, on obtient une réponse modèle d'un réflecteur en coin trièdre seulement si les quatre canaux du système radar montrent le même gain, s'il n'existe aucune différence de phase dépendant du système entre les canaux et s'il n'y a aucune perte d'énergie d'un canal à l'autre.

Pour les **paramètres du système radar**, les gains et les phases des canaux devraient correspondre le plus possible. Dans le cas de la concordance des phases, le trajet du signal devrait ainsi être le même pour tous les canaux. Ces signaux d'étalonnage sont généralement pris en compte lors de la conception du système afin d'aider à la vérification de la concordance des canaux.

Quant à l'**analyse des données** de réception, elle permet de mesurer et de corriger les effets de la concordance des canaux, de l'intermodulation et du bruit. En plus de l'analyse des signaux d'étalonnage internes, on utilise des signaux de cibles connues, telles les réflecteurs en coin, les transpondeurs actifs ou le fouillis uniforme, pour étalonner certains de ces paramètres.

Applications polarimétriques

Pour l'instant, les données polarimétriques de radars à synthèse d'ouverture se limitent à quelques survols de systèmes RSO aéroportés expérimentaux et à la mission de la navette

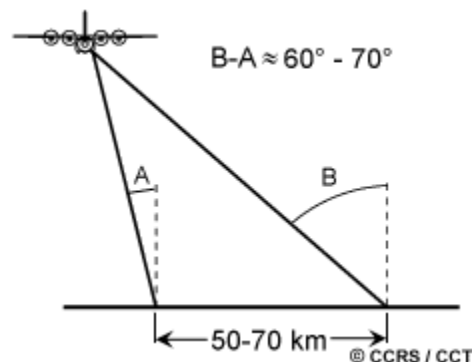
SIR-C. Les scientifiques ont tout de même utilisé ces données pour de nombreuses applications. En outre, ils ont démontré une meilleure interprétation de nombreux éléments d'une scène lorsque le radar fonctionne en mode polarimétrique. Le lancement de RADARSAT-2 rendra les données polarimétriques accessibles sur une base opérationnelle, ainsi l'utilisation de telles données se perfectionnera et deviendra pratique courante.

Voici une liste d'applications pour lesquelles le RSO polarimétrique s'avère déjà utile:

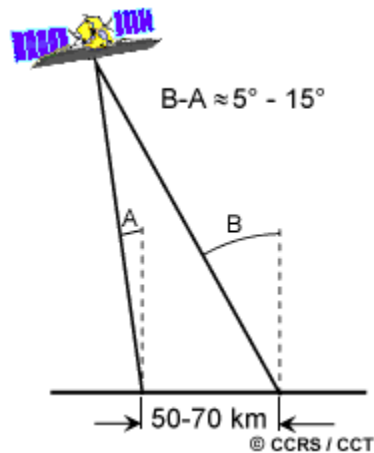
- Agriculture : pour l'identification des types de récolte, la surveillance de l'état des cultures, les mesures d'humidité du sol, l'identification du travail du sol et des résidus de culture.
- Foresterie : pour la cartographie des zones de coupe à blanc et des éléments linéaires, l'estimation de la biomasse, l'identification des espèces forestières, la cartographie des cicatrices de feu.
- Géologie : pour la cartographie géologique.
- Hydrologie : pour la surveillance des zones humides et de la couverture de la neige.
- Océanographie : pour l'identification de la glace de mer, la mesure des vents d'afflux et de reflux, la mesure de l'inclinaison de la houle.
- Transport maritime : pour la détection et la classification des navires.
- Zone côtière : pour la détection du littoral, la cartographie du substrat, la détection des nappes d'hydrocarbures et la cartographie de la végétation.

3.9 Radars aéroportés et spatioportés

Tout comme les autres systèmes de télédétection, un capteur radar qui acquiert des images peut être installé sur une plate-forme aéroportée ou sur un satellite. Selon l'utilisation finale de l'imagerie, l'on trouvera plus d'avantages à l'un ou l'autre des deux types de plates-formes. Quelle que soit la plate-forme utilisée, les radars à synthèse d'ouverture (RSO) possèdent l'avantage d'une résolution spatiale indépendante de l'altitude de la plate-forme. Une bonne résolution est donc possible à partir des deux types de plates-formes, aéroportée ou spatioportée.



Bien que la résolution spatiale soit indépendante de l'altitude, la géométrie de visée et la fauchée peuvent être grandement affectés par une variation en altitude. Aux altitudes opérationnelles des avions, un radar aéroporté doit couvrir une grande étendue d'angle d'incidence (jusqu'à 60 ou 70 degrés), pour couvrir un couloir de 50 à 70 km. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, l'angle d'incidence a un effet important sur le signal rétrodiffusé des structures particulières de la surface et sur leur apparence sur une image. Les caractéristiques des images, telles que le repliement et l'ombrage, sont sujettes à de grandes variations lors de l'utilisation d'une grande étendue d'angle d'incidence. Les radars spatiaux sont capables de contourner certains de ces problèmes de géométrie visuelle puisqu'ils opèrent à des altitudes qui sont plus de 100 fois plus hautes que les radars aéroportés. À des altitudes de plusieurs centaines de kilomètres, les radars spatiaux peuvent acquérir des images sur des fauchées comparables à celles des radars aéroportés, mais dans une plus petite gamme d'angles d'incidence (entre cinq et quinze degrés). Ceci donne une illumination plus uniforme et réduit les variations indésirables dues à la géométrie de visée à travers la fauchée.



Bien que les radars aéroportés soient plus sensibles aux problèmes d'imagerie dus à la géométrie, ils sont flexibles quant à la capacité d'acquérir des données à partir de différents angles et directions de visée. En optimisant la géométrie pour un terrain en particulier, ou en acquérant une image à partir de plus d'une direction, certains de ces effets peuvent être réduits. De plus, un radar aéroporté est capable de prendre des données partout et en tout temps (dans la mesure où les conditions atmosphériques permettent le vol de l'avion). Un radar spatioporté n'a pas cette flexibilité puisque sa géométrie de visée et son horaire d'acquisition des données sont contrôlés par son orbite. Cependant, les radars spatioportés ont l'avantage de pouvoir acquérir des images plus rapidement au-dessus de plus grandes régions que les radars aéroportés, avec une géométrie de visée consistante. La fréquence de cette couverture n'est peut-être pas aussi grande qu'avec une plate-forme aérienne, mais selon les paramètres orbitaux, la flexibilité de la géométrie de visée et la région géographique étudiée, un radar spatial peut avoir une fréquence de visite aussi courte qu'un jour.

Comme c'est le cas de tout avion, un radar aéroporté est sujet aux variations de vitesse et aux autres mouvements de l'avion, ainsi qu'aux conditions météorologiques. Afin d'éviter des erreurs d'artefact ou de positionnement dues aux variations aléatoires du mouvement de l'avion, le système radar doit utiliser un système de navigation et de télémétrie sophistiqué et un traitement de l'image avancé pour compenser. Généralement, ceci permet de corriger la plupart des variations de mouvement, sauf les plus fortes (telles que de la turbulence importante). Les radars spatioportés ne sont pas affectés par ce type de mouvement. En effet, leur orbite est généralement très stable et leur position peut être calculée très précisément. Cependant, des corrections géométriques de l'image doivent être faites pour les radars spatioportés en tenant compte des autres effets, tels que la rotation et la courbure de la Terre, pour obtenir le positionnement géométrique propre aux éléments étudiés sur la surface.

3.10 Systèmes radars aéroportés et spatioportés

Afin d'illustrer plus clairement les différences entre les radars aéroportés et spatioportés, nous allons brièvement décrire quelques-uns des systèmes représentatifs de chaque type, en commençant par les systèmes aéroportés.



Le RSO C/X du Convair-580 développé et exploité par le Centre canadien de télédétection a été l'un des systèmes les plus utilisés dans la recherche expérimentale et les applications RSO avancées au Canada et dans le monde, particulièrement dans la préparation des satellites RSO aéroportés. Le système a été transféré à Environnement Canada en 1996 pour la recherche sur les déversements d'hydrocarbures et autres applications environnementales. Ce système fonctionne en bande C (5,66 cm) et en bande X (3,24 cm).

Des données prises en polarisations croisées peuvent être enregistrées simultanément pour les deux bandes C et X, et la bande C peut être utilisée comme un radar polarimétrique. Les images peuvent être obtenues avec trois différentes géométries de visée (les modes Nadir, Étroit et Large) avec une large gamme d'angles d'incidence (de 5 à presque 90 degrés). En plus d'être un système complètement calibrable pour des mesures quantitatives, il possède une deuxième antenne sur le fuselage de l'avion qui permet au système en bande C d'opérer en tant que radar interférométrique.



Le système STAR (Sea Ice and Terrain Assessment) exploité par Intera Technologies Limited de Calgary, Alberta, (maintenant Intermap Technologies), a été l'un des premiers systèmes RSO utilisés commercialement autour du globe. Star-1 et Star-2 fonctionnent tous deux en bande X (3,2 cm), avec polarisation HH dans deux modes de résolution. La couverture de la fauchée varie entre 19 et 50 km avec des résolutions allant de 5 à 18 m. Ils ont d'abord été conçus pour la surveillance de la glace de mer (une des applications clés des radars au

Canada) et pour l'analyse des terrains. La capacité des radars à opérer jour et nuit, en toutes conditions météorologiques, en font des outils idéaux pour la surveillance de la glace dans les eaux côtières du nord du Canada. STAR-1 a été le premier système RSO à faire le traitement des données à bord de l'avion et à offrir la transmission des données en temps réel aux stations de surface.

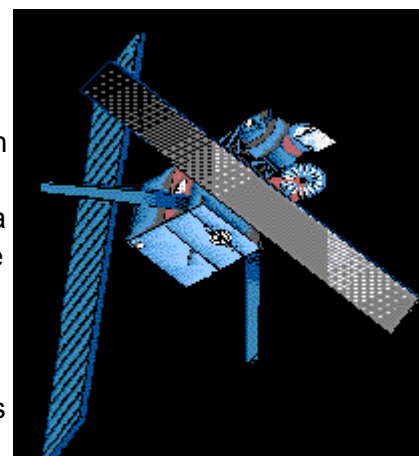


été un chef de file pour la recherche dans les systèmes multispectraux et RSO à polarisation multiple depuis de nombreuses années. Le Jet Propulsion Lab (JPL) en Californie a reçu par contrats, le mandat d'exploitation de divers systèmes de pointe pour la NASA. Le système AirSAR est un RSO polarimétrique qui fonctionne en bandes C, L ou P, pouvant recueillir des données dans toutes les combinaisons de polarisation (HH, HV, VH, VV). Les données provenant du système AirSAR peuvent être complètement calibrées pour permettre l'extraction de mesures rétrodiffusées. La résolution spatiale du système AirSAR est de l'ordre de 12 mètres en portée et en azimuth. L'angle d'incidence varie de zéro jusqu'à environ 70 degrés. Cette capacité d'acquérir des données avec des fréquences et des polarisations multiples et dans une aussi vaste gamme d'angles d'incidence, permet la réalisation d'une multitude d'expériences spécialisées en recherche.

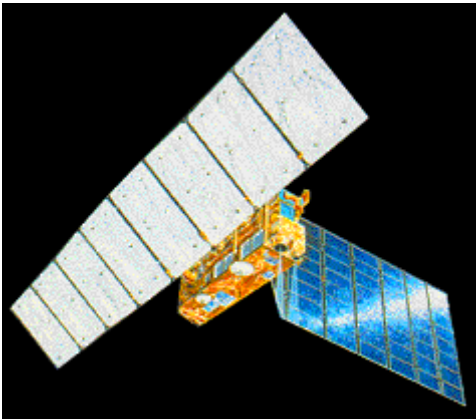


Avec la modernisation et les succès de l'imagerie radar aéroportée, les radars spatioportés constituaient la suite logique pour compléter les satellites optiques en fonction. SEASAT, lancé en 1978, fut le premier satellite de télédétection civile à comporter un capteur RSO. Ce RSO fonctionnait dans la bande L (23,5 cm) avec une polarisation HH. La géométrie de visée s'établissait entre neuf et quinze degrés, avec une fauchée de 100 km et une résolution spatiale de 25 mètres. Cette géométrie de visée abrupte fut principalement désignée à l'observation des océans et de la glace de mer, mais une importante quantité d'images furent également prises au-dessus des masses continentales. Cependant, les petits angles d'incidence augmentaient l'effet de repliement au-dessus des terrains accidentés, limitant son utilisation dans ces régions. Les trois mois où ce satellite a été opérationnel ont suffi à démontrer le potentiel des radars spatioportés.

Devant le succès obtenu par le RSO de SEASAT, et profitant de l'impulsion provenant des résultats positifs des RSO aéroportés, l'Agence Spatiale Européenne (ASE) lança le ERS-1 en juillet 1991. Le ERS-1 avait à son bord un radar altimètre, un radiomètre à infrarouge, un sondeur à hyperfréquences et un radar actif à hyperfréquences dans la bande C (5,66 cm). C'est un instrument flexible qui peut être utilisé comme rétrodiffusomètre pour mesurer la réflectivité de la surface de l'océan, ainsi que la vitesse et la direction des vents de surface en mer. Il peut aussi être utilisé comme RSO, prenant des images avec une fauchée de plus

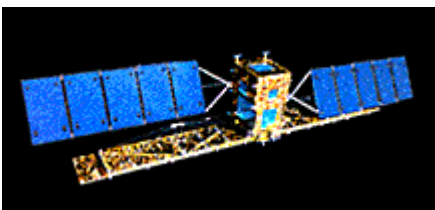


de 100 km avec des angles d'incidence variant de 20 à 26 degrés, et une résolution de 30 mètres. Les polarisations de transmission et de réception sont toutes deux verticales (VV), et combinées à un angle de visée abrupt, elles font du ERS-1 un système sensible à la rugosité de la surface. La fréquence de visite (ou cycle) du ERS-1 peut varier en ajustant son orbite, de 3 à 168 jours, selon le mode d'opération. Généralement, le cycle est de 35 jours. Un deuxième satellite, le ERS-2, fut lancé en avril 1995 et contient les mêmes capteurs que le ERS-1. La principale utilisation du ERS-1 était la surveillance et la recherche en océanographie. Il fut le premier satellite radar à procurer à la communauté mondiale de télédétection un accès étendu aux données RSO spatioportées. L'imagerie provenant de ces deux satellites a été utilisée dans plusieurs types d'applications, au-dessus des océans et des continents. Tout comme pour SEASAT, les angles d'incidence abrupts limitent leur utilité dans certaines applications au-dessus des terres à cause des effets de la géométrie de visée.



L'Agence nationale de développement spatial du Japon a lancé le satellite JERS-1 en février 1992. En plus d'inclure deux capteurs optiques, le JERS-1 a un RSO dans la bande L (23,5 cm) opérant en polarisation HH. La largeur de sa fauchée est approximativement de 75 km, avec une résolution spatiale de 18 mètres. Les angles d'incidence du RSO de JERS-1 sont un peu moins étendus que ceux de SEASAT et des satellites ERS. Au milieu de sa fauchée, l'angle d'incidence est de 35 degrés. Les images du JERS-1 sont donc un peu moins sensibles à la géométrie et aux effets de terrain.

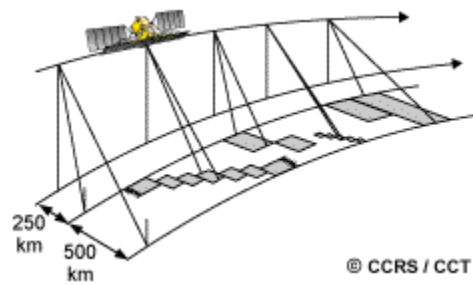
La grande longueur d'onde de la bande L du JERS-1 permet une plus grande pénétration de l'énergie radar dans la végétation et autres types de surface.



La télédétection avec système RSO sur satellite a fait un pas de géant avec le lancement du satellite RADARSAT, le 4 novembre 1995. Le projet RADARSAT, dirigé par l'Agence spatiale canadienne (ASC), a été fondé sur le développement de technologies et d'applications de télédétection du Centre canadien de télédétection (CCT)

depuis les années 70. RADARSAT comporte un RSO à bande C (5,6 cm) à polarisation HH, avec un faisceau radar variable qui permet plusieurs options d'imagerie dans un couloir de fauchée de 500 km. La fauchée peut varier entre 35 à 500 km de largeur avec une résolution de 10 à 100 mètres. La géométrie de visée est aussi flexible, avec des angles d'incidence variant de moins de 20 degrés jusqu'à plus de 50 degrés. Bien que le cycle de son orbite soit de 24 jours, la flexibilité de son faisceau variable permet à RADARSAT de voir une région avec une plus grande fréquence et de répondre à des demandes d'observations particulières. L'orbite de RADARSAT est optimisée pour de fréquentes couvertures des latitudes moyennes jusqu'aux régions polaires, elle peut donner des images quotidiennes de toute la région arctique et elle permet de voir n'importe quelle région du Canada en trois jours. Même aux

latitudes équatoriales, l'on peut obtenir une couverture complète en six jours, en utilisant le plus large couloir de 500 km.



Plusieurs options d'imagerie



3. Notes finales

3.11 Notes finales

Vous venez de compléter le Chapitre 3 - Télédétection par micro-ondes. Vous pouvez poursuivre avec le Chapitre 4 - Interprétation des images et analyse ou aller fureter sur le site Web du CCT où vous trouverez d'autres articles reliés à la télédétection par micro-ondes.

Vous obtiendrez plus d'information sur les radars en consultant ce [résumé](#)¹ et le site suivant vous apportera des [spécifications plus techniques](#)² sur le satellite canadien RADARSAT. Vous pouvez voir des [photos](#)³ du satellite en construction ou regarder un [vidéode son lancement et voir sa toute première image](#)⁴. Pendant que vous y êtes, voyez comment la télédétection par micro-ondes est utilisée dans une variété d'applications telles que l'[agriculture](#)⁵, la [foresterie](#)⁶ et la [géologie](#)⁷. Voyez également les [applications internationales](#)⁸ de l'imagerie RADARSAT.

Voulez-vous apprendre comment [réduire le chatoiement](#)⁹ sur une image radar? C'est une technique qui a été développée par des chercheurs du CCT en coopération avec des chercheurs français. Voyez aussi comment un modèle numérique d'altitude (MNA) peut être utilisé pour [corriger les distorsions topographiques](#)¹⁰ des images radar et comment une image radar est calibrée au moyen d'un [transpondeur de précision](#)¹¹. Ne manquez pas de voir le mystifiant déplacement du [transpondeur](#)¹² sur une image!

Vous trouverez un [manuel de formation](#)¹³ montrant comment l'on peut utiliser les données radar pour obtenir des images en stéréo. Une autre technique fascinante qui est étudiée activement au CCT, c'est l'[interferométrie](#)¹⁴. L'interférométrie a été expérimentée aussi bien avec des données aéroportées qu'avec des données acquises par satellite et elle trouve des applications dans la détection des changements de l'[utilisation du sol](#)¹⁵, du [mouvement des glaciers](#)¹⁶ et dans l'[étude des océans](#)¹⁷.

Notre glossaire de télédétection est une mine d'information terminologique et comprend des explications approfondies sur les concepts reliés aux micro-ondes. On y accède par des [termes particuliers de recherche](#)¹⁸ ou en sélectionnant la catégorie « radar ».

¹http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/specs/rsatoview_f.html

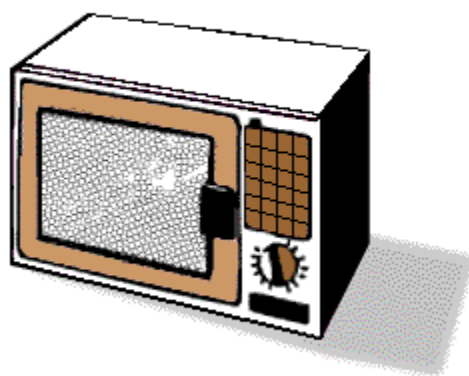
²http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/specs/radspec_f.html

- ³http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/photos/radpix_f.html
- ⁴http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/photos/radpix_f.html
- ⁵http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbagri_f.html
- ⁶http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbfort_f.html
- ⁷http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbgeol_f.html
- ⁸http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbgbsar_f.html
- ⁹http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/com/rsnewsltr/2303/2303ap1_f.html
- ¹⁰http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/com/rsnewsltr/2401/2401ap3_f.html
- ¹¹http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/trans/transpo_f.html
- ¹²http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/ana/transpond/rpt_f.html
- ¹³http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/stereosc/chap1/chapter1_1_f.html
- ¹⁴http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbinter_f.html
- ¹⁵http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/com/rsnewsltr/2301/2301rn2_f.html
- ¹⁶http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/ant/rant01_f.html
- ¹⁷http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/ana/split/insar_f.html
- ¹⁸http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary/glossary_f.html



3. Le saviez-vous?

3.1 Le saviez-vous?



© CCRS / CCT

Les fours à micro-ondes utilisent des magnétrons utilisant la bande «S» dans la gamme de fréquence située entre 2 et 4 GHz (correspondant à des longueurs d'ondes se situant entre 15 et 7,5 cm). Le grillage de métal utilisé dans la fabrication de la porte est tellement fin (à maille beaucoup plus petite que 7,5 cm) qu'il agit comme une surface de métal uniforme. Ce grillage évite aux micro-ondes de s'échapper tout en permettant une bonne visibilité à l'intérieur (en utilisant les longueurs d'ondes visibles qui sont beaucoup plus petites).

3.2 Le saviez-vous?

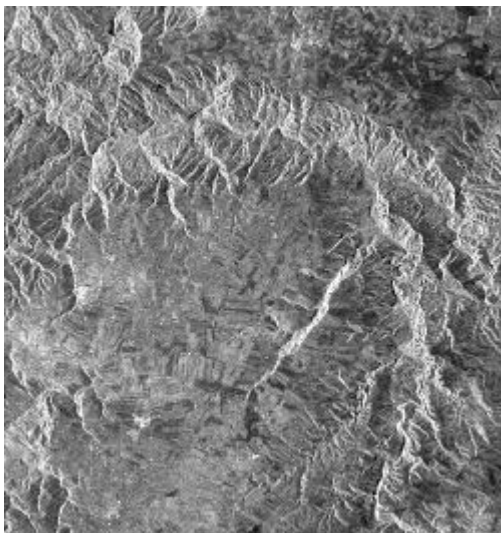
« Mais que peuvent bien représenter ces nombres? »



Les produits de télédétection typiques (une image RADARSAT, par exemple) sont constitués de données en format de 8 ou 16 bits. Pour obtenir toutes les caractéristiques physiques originales des valeurs de rétrodiffusion (σ^0 ou β^0) des produits radars calibrés, on doit inverser les étapes final σ^0 de la chaîne de β^0 tement du RSO. Pour l'imagerie RADARSAT, on doit d'abord mettre les valeurs numériques au carré et appliquer une table de rehaussement radiométrique (dont la valeur varie en fonction de la portée). Comme vous pouvez le constater, les relations entre les valeurs numériques de l'image ne sont pas simples!

3.4 Le saviez-vous?

« Regardez à gauche, regardez à droite, debout, assis... »

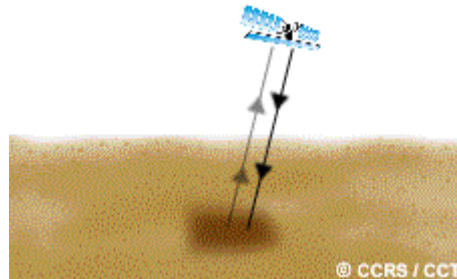


...Bien que les radars à vue latérale puissent provoquer des effets comme le repliement et les ombrages, leur géométrie est précisément ce qui en fait des outils aussi utiles pour l'analyse de terrain. Ces effets, s'ils ne sont pas trop importants, peuvent même augmenter l'apparence du relief et des structures du terrain, faisant de l'imagerie radar, un excellent outil pour des applications telles que la cartographie topographique et l'identification des structures géologiques.

3.5 Le saviez-vous?

« Des rivières dans le désert du Sahara?

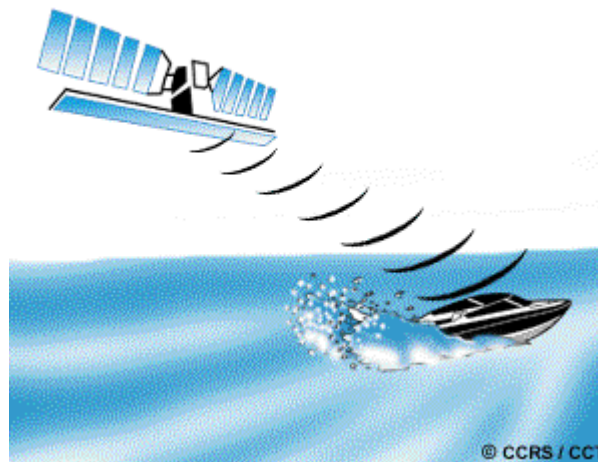
...Ça va pas!... »



... Un radar à bande L (longueur d'onde de 23,5 cm), fonctionnant à partir de la navette spatiale en orbite, a découvert une ancienne rivière sous le désert du Sahara, en Afrique du Nord. La grande longueur d'onde et la sécheresse extrême du sable ont permis aux ondes de pénétrer plusieurs mètres sous la surface et ainsi de révéler le lit de l'ancienne rivière.

3.7 Le saviez-vous?

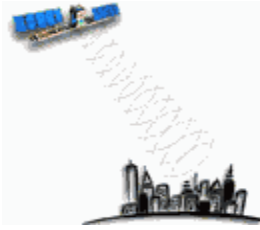
« Nous avons un objet non identifié sur le radar... »



...En plus d'être capable de déterminer la hauteur des terrains grâce à l'interférométrie, il est aussi possible de mesurer la vitesse à laquelle les cibles bougent vers ou à en s'éloignant du radar, en utilisant seulement un balayage au-dessus de la cible. On obtient ceci en enregistrant le signal de retour de deux antennes placées sur une plate-forme et séparées par une petite distance dans la direction de vol. La différence de phase entre les deux signaux de retour à chaque antenne est utilisée pour dériver la vitesse de la cible dans la scène. Les applications possibles de cette technique sont entre autres, le mouvement des glaces sur l'eau, les courants marins et les paramètres des vagues marines.

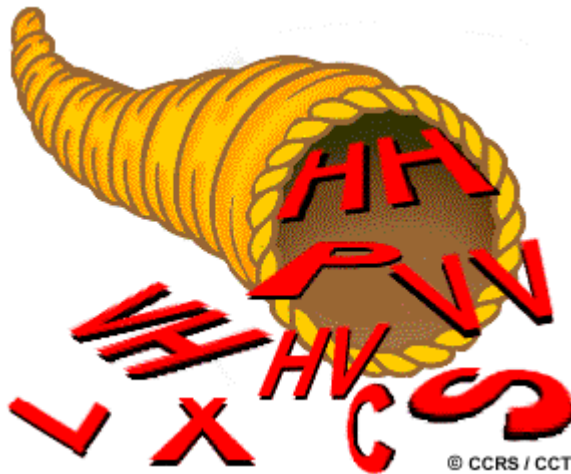
3.8 Le saviez-vous?

De nombreux autres types de polarisation peuvent être transmis (ou reçus) si le système radar transmet ou reçoit les canaux H et V **simultanément**. Par exemple, si le système radar transmet simultanément des signaux H et V avec un signal V décalé de 90° par rapport au signal H, l'onde résultante transmise aura une polarisation **circulaire**.



3. Questions éclairées et réponses

3.2 Questions éclairées



Comment pouvons-nous utiliser les images radars avec différentes longueurs d'onde et différentes polarisations pour extraire le plus d'information possible d'une scène ?

Rappelez-vous le chapitre 1 : les caractéristiques générales des images de télédétection, et le chapitre 2 : l'interprétation des données provenant des capteurs optiques.

Expliquez comment des données provenant d'un diffusomètre qui ne produit pas d'image, peuvent être utilisées pour extraire plus précisément de l'information d'une image radar.

3.2 Réponses - Questions éclairées

1. Tout comme les capteurs optiques avec différentes bandes ou canaux de données, les images radars provenant de plusieurs longueurs d'ondes peuvent amener de l'information complémentaire. Les données radars acquises à des longueurs d'ondes différentes sont comme les données provenant de la télédétection dans le visible. De même, les différentes polarisations peuvent être considérées comme des bandes d'information différentes. L'interaction avec les éléments de la surface se fera d'une façon différente selon longueur d'onde et la polarisation. Comme pour les données de bandes multiples en optique, nous pouvons combiner ces différents canaux de données pour produire des images en couleurs qui peuvent mettre en évidence certaines variations subtiles dans les structures en fonction de la longueur d'onde ou de la polarisation.

2. Un diffusomètre est utilisé pour mesurer précisément l'intensité rétrodiffusée d'un objet ou d'une surface. En caractérisant précisément (c.-à-d. en mesurant) l'intensité de l'énergie réfléchi à partir des objets et des surfaces de toutes sortes, ces mesures peuvent être utilisées pour générer des signatures de rétrodiffusion typiques, semblables au concept de signature spectrale en optique. Ces mesures peuvent être utilisées comme références pour l'étalonnage des images à partir de capteurs radars, de manière à pouvoir faire des comparaisons plus précises de la réponse des différents éléments.

3.3 Questions éclairées



Expliquer pourquoi l'utilisation des radars à synthèse d'ouverture est la seule option pour la télédétection radar à partir de l'espace.

3.3 Réponse question éclairée

La haute altitude des plates-formes spatiales (des centaines de kilomètres) empêche l'utilisation des radars à ouverture réelle (ROR) parce que la résolution azimutale, qui est fonction de la distance, serait trop mauvaise pour être utilisée. Les ROR ne peuvent obtenir une bonne résolution que s'ils ont un très petit faisceau, ce qui demanderait une antenne immense, longue de plusieurs kilomètres, qui serait impossible à fabriquer ou à mettre en orbite. Nous avons donc besoin des radars à synthèse d'ouverture (RSO) pour simuler une longue antenne qui permette une bonne résolution.

3.5 Question éclairée



Si une région agricole comprenant des champs de blé et de grain était inondée, quelle serait son apparence sur une image radar? Expliquez les raisons de votre réponse en vous basant sur vos connaissances de l'interaction entre l'énergie et la cible.

3.5 Réponse - Question éclairée

En général, la brillance d'une image augmente avec le taux d'humidité. Mais, dans le cas d'une inondation où la surface est complètement recouverte et devient stable, les régions où l'eau recouvre les récoltes apparaîtront plus sombres puisque l'eau agit comme réflecteur spéculaire et fait réfléchir l'énergie loin du capteur. Les régions inondées se distinguent généralement par une teinte plus foncée par rapport aux champs avoisinants qui ne sont pas inondés et qui diffusent donc plus de signal. Mais si le blé et le grain ne sont pas complètement submergés, ces régions peuvent apparaître plus claires sur l'image. Dans ce cas, la réflexion spéculaire provenant de l'eau serait réfléchiée sur les tiges des plantes et produirait une réflexion vers le radar. Ceci rendra ces régions apparaître plus brillantes sur l'image. Le niveau d'inondation et la quantité des récoltes submergées ont donc un impact sur la brillance de l'image.

3.6 Question éclairée



Décrivez les étapes de base nécessaires avant d'effectuer une interprétation visuelle d'une image radar.

3.6 Réponse question éclairée

Avant de faire une interprétation visuelle et une analyse d'une image radar, il serait utile de suivre les étapes suivantes :

- Convertir l'image en distance oblique en image à distance au sol. Ceci enlèvera les effets de distorsion de perspective afin que les objets apparaissent dans leurs dimensions respectives sur toute la largeur de la fauchée et permettra d'obtenir une représentation juste des distances au sol.
- Corriger les effets du diagramme d'antenne. Ceci donnera une image avec une brillance moyenne uniforme, facilitant l'interprétation visuelle et la comparaison des éléments à des distances différentes.
- Réduire les effets de chatoiement. À moins que l'on ait besoin de beaucoup de petits détails pour l'analyse (plus petits que quelques pixels), la réduction du chatoiement améliorera l'apparence de l'image et rendra l'interprétation généralement plus simple. Étaler l'étendue dynamique entre 0 et 256 niveaux (8 bits) de gris.
- Puisque les limites de la plupart des ordinateurs et de l'oeil humain ne permettent pas de distinguer les niveaux de brillance, un plus grand nombre de niveaux de gris s'avère inutile.

3.8 Question éclair



Est-ce que les ondes sonores peuvent être polarisées?

3.8 Réponse question éclair

Le phénomène de la polarisation caractérise les ondes qui se déplacent dans une direction **perpendiculaire** à la direction de propagation. Contrairement aux ondes électromagnétiques qui se déplacent en parallèle dans des directions intermédiaires, les ondes sonores vibrent dans la **même direction** que la direction de propagation, elles ne peuvent donc pas être polarisées.



3.10 Question éclairée



Un objet, ou un élément particulier, peut ne pas avoir la même apparence (c.-à-d. la même réponse rétrodiffusée) sur toutes les images radars, en particulier avec les radars spatioportés par rapport aux radars aéroportés. Faites la liste des facteurs qui pourraient contribuer à ce phénomène.

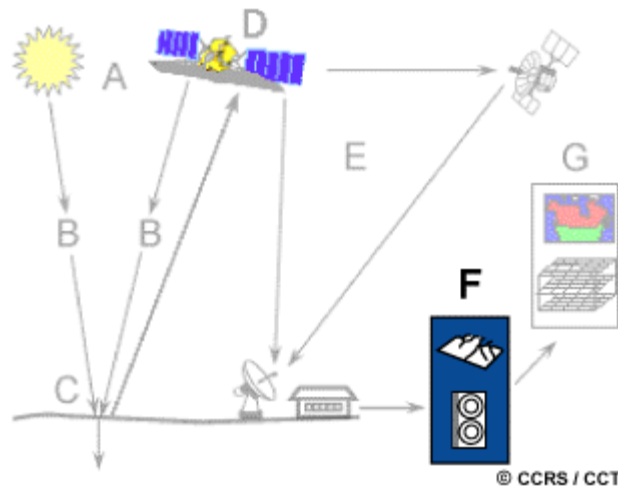
3.10 Réponse

Un objet, ou un élément particulier, peut ne pas avoir la même apparence (c.-à-d. la même réponse rétrodiffusée) sur toutes les images radars, en particulier avec les radars spatioportés par rapport aux radars aéroportés. Faites la liste des facteurs qui pourraient contribuer à ce phénomène.



4. Analyse et interprétation d'image

4.1 Introduction



Pour tirer avantage des données de télédétection, il faut être en mesure d'extraire de **l'information significative** de l'imagerie. C'est le sujet discuté dans ce chapitre - Interprétation et analyse - la sixième étape du processus de télédétection défini au chapitre 1. L'interprétation et l'analyse de l'imagerie de télédétection ont pour but d'identifier et de mesurer différentes cibles dans une image pour pouvoir en extraire l'information utile. En télédétection, une cible est définie comme étant toute structure ou objet observable dans une image.

- Les cibles peuvent être des points, des lignes ou des surfaces. Elles peuvent donc présenter des formes variées : un autobus dans un stationnement, un avion sur une piste, un pont, une route, un grand champ ou une étendue d'eau.
- La cible doit être distinctive, c.-à-d. qu'elle doit contraster avec les structures avoisinantes.



L'interprétation et l'identification des cibles en télédétection sont souvent faites de façon visuelle, c'est-à-dire par un interprète humain. Dans plusieurs cas, l'imagerie est présentée dans un format photographique, indépendamment du type de capteurs et de la manière dont les données sont acquises. Dans ce cas, nous dirons que les données sont en **format analogique**. Comme nous l'avons vu au chapitre 1, les images de télédétection peuvent être



représentées au moyen d'un ordinateur par une matrice de pixels, où chaque pixel correspondant à un **nombre**, représentant le niveau d'intensité du pixel. Dans ce cas, les données sont en format **numérique**. L'interprétation visuelle peut aussi être faite en examinant l'imagerie numérique sur un écran d'ordinateur. Les imageries analogique et numérique peuvent toutes deux être représentées en noir et blanc (images **monochromatiques**) ou en composés couleurs (voir chapitre 1, section 1,7) en combinant différents canaux ou bandes représentant différentes

longueurs d'onde.

Quand des données de télédétection sont disponibles en format numérique, le **traitement et l'analyse numériques** peuvent être faits au moyen d'un ordinateur. Le traitement peut servir à rehausser les données en prévision d'une interprétation visuelle. Des traitements et analyses numériques peuvent être faits automatiquement afin d'identifier des cibles et d'extraire l'information sans l'intervention d'un interprète humain. Cependant, le traitement et l'analyse numériques sont presque toujours utilisés en appui et en complément à l'interprétation humaine.

L'interprétation et l'analyse visuelles datent du tout début de la télédétection avec l'interprétation de photos aériennes. Le traitement et l'analyse numériques sont plus récents

avec la venue des enregistrements numériques des données de télédétection et le développement des ordinateurs. Les techniques analogiques et numériques pour l'interprétation des données de télédétection ont leurs avantages et désavantages respectifs.

En général, l'interprétation visuelle requiert peu ou pas d'équipement, tandis que l'analyse numérique requiert de l'équipement spécialisé et parfois dispendieux. L'interprétation visuelle est souvent limitée à un seul canal de données ou une seule image à la fois, en raison de la difficulté d'effectuer une interprétation visuelle avec plusieurs images. Les ordinateurs étant en mesure de traiter des images plus complexes, l'analyse numérique peut s'effectuer à partir de données provenant de plusieurs canaux. Dans cette optique, l'analyse numérique, est utile pour l'analyse simultanée de plusieurs bandes spectrales et elle peut traiter des banques de données plus rapidement qu'un interprète humain. L'interprétation humaine est un procédé subjectif, ce qui veut dire que les résultats peuvent varier d'un interprète à l'autre. L'analyse numérique, puisqu'elle est basée sur la manipulation de nombres par un ordinateur est plus objective, ce qui donne des résultats reproductibles. Cependant, la précision des résultats provenant de traitements numériques peut être difficile, puisqu'elle doit être validée par les analystes.

Rappelons que les analyses visuelles et numériques de l'imagerie de télédétection ne s'excluent mutuellement. Les deux méthodes ont chacune leurs mérites, et c'est en combinant les deux que se font la plupart des analyses de l'imagerie. La décision finale quant à l'importance et l'utilité de l'information extraite à la fin du processus d'analyse, revient toujours aux analystes.

4.2 Éléments d'interprétation visuelle

Comme nous l'avons vu à la section précédente, l'analyse d'imagerie de télédétection nécessite l'identification de différentes cibles sur une image. Ces cibles peuvent être des structures naturelles ou artificielles, faites de divers points, lignes ou surfaces. Les cibles peuvent être définies en fonction de la manière dont elles diffusent le rayonnement. L'intensité du rayonnement est mesurée et enregistrée par un capteur pour être ensuite transformée en un produit utilisable tel qu'une photo aérienne ou une image satellite.

Qu'est-ce qui fait de l'interprétation de l'imagerie une tâche plus difficile que l'interprétation de ce qui nous entoure dans notre quotidien? D'abord, nous perdons notre sens de la perspective en regardant une image en deux dimensions, à moins de la regarder en **stéréoscopie** pour simuler une troisième dimension. En effet, dans plusieurs applications, la visualisation stéréo est un atout important pour l'interprétation puisque la reconnaissance d'une cible y est rehaussée de façon spectaculaire. À vol d'oiseau, les objets peuvent avoir une apparence très différente de celle à laquelle nous sommes habitués. La combinaison d'une perspective inhabituelle, d'une échelle très différente et du peu de détails fait que les objets les plus familiers sont parfois méconnaissables sur une image. Enfin, comme nous avons l'habitude de ne voir que les longueurs d'onde de la zone visible du spectre électromagnétique, il nous est plus difficile de comprendre l'imagerie des longueurs d'onde des autres zones du spectre.

La reconnaissance des cibles est la clé de l'interprétation et de l'extraction d'information. L'observation des différences entre les cibles et leurs arrière-plans implique la comparaison entre différentes cibles en se basant sur une combinaison des caractéristiques suivantes : **ton, forme, taille, patron, texture, ombre et association**. Consciemment ou non, nous utilisons régulièrement ces caractéristiques pour les interprétations visuelles que nous effectuons quotidiennement. L'observation des images satellites lors des bulletins de météo ou l'observation d'une poursuite rapide à partir d'un hélicoptère sont des exemples familiers d'interprétation d'images visuelle. L'identification des cibles en télédétection basée sur les 7 caractéristiques visuelles nous permet de mieux interpréter et analyser. Chacune de ces caractéristiques d'interprétation est décrite ci-dessous, avec une image en exemple pour chaque cas.



Le **ton** réfère à la clarté relative ou la couleur (teinte) des objets dans une image. Généralement, la nuance de ton est l'élément fondamental pour différencier les cibles et les structures. Les variations de ton permettent aussi la différenciation des formes, textures et patrons des objets.



La **forme** réfère à l'allure générale, la structure ou le contour des objets Pris individuellement. La forme peut être un indice très important pour l'interprétation. Les formes aux bordures rectilignes se retrouvent généralement dans les régions urbaines ou sont des champs agricoles, alors que les structures naturelles, telles que les bordures des forêts, sont généralement plus irrégulières, sauf dans les endroits où l'homme a construit une route ou effectué une coupe à blanc. Les fermes où les champs de culture irrigués par des systèmes d'arrosage automatiques présentent des formes circulaires.



La **taille** d'un objet sur une image est fonction de l'échelle. Il est important d'évaluer la taille d'une cible par rapport aux autres objets dans une scène (taille relative), ainsi que la taille absolue, afin d'aider l'interprétation de cette cible. Une évaluation rapide de la taille approximative d'une cible facilite souvent l'interprétation. Par exemple, dans une image où l'on aurait à distinguer différentes zones d'utilisation du sol et à identifier une aire comportant des bâtiments, les grosses structures telles que les usines ou les entrepôts suggéreraient des propriétés commerciales, tandis que de plus petits éléments suggéreraient des lieux résidentiels.

Le **patron** réfère à l'agencement spatial des objets visiblement discernables. Une répétition ordonnée de tons similaires et de textures produit un patron distinctif et facilement reconnaissable. Les vergers avec leurs arbres régulièrement disposés, ou les rues régulièrement bordées de maisons sont de bons exemples de patrons.



La **texture** réfère à l'arrangement et à la fréquence des variations de teintes dans des régions particulières d'une image. Des textures rugueuses consisteraient en des tons en rayures où les niveaux de gris changent brusquement dans une petite région, alors que les textures lisses auraient peu ou pas de variations de tons. Les textures lisses sont souvent le résultat de surfaces uniformes telles que des champs, du pavement ou des terrains gazonnés. Une cible avec une

surface rugueuse et une structure irrégulière, telle qu'une forêt, résulte en une texture d'apparence rugueuse. La texture est l'un des éléments les plus importants pour différencier les structures sur une image radar.

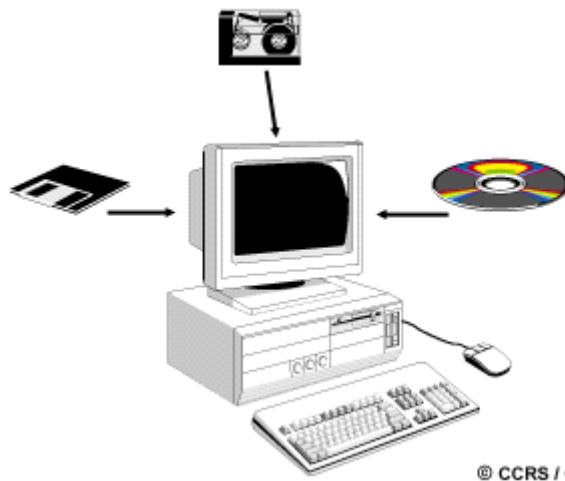
Les **ombres** sont aussi utiles pour l'interprétation puisqu'elles donnent une idée du profil et de la hauteur relative des cibles pouvant être identifiées facilement. Les ombres peuvent cependant réduire, voire éliminer l'interprétation dans leur entourage, puisque les cibles situées dans les ombres sont moins, ou pas du tout discernables. En imagerie radar, les ombres sont particulièrement utiles pour rehausser ou identifier la topographie et les formes géologiques, particulièrement en imagerie radar.



L'**association** tient compte de la relation entre la cible d'intérêt et d'autres objets ou structures reconnaissables qui sont à proximité. L'identification d'éléments qu'on s'attend normalement à retrouver à proximité d'autres structures peut donner de l'information facilitant l'identification. Dans l'exemple ci-dessous, les propriétés commerciales peuvent être associées avec les routes à proximité, alors que les aires résidentielles seraient associées avec les écoles, les terrains de jeux et

de sports. Dans notre exemple, un lac est associé à des bateaux, à une marina et à un parc récréatif tout près.

4.3 Traitement numérique des images



De nos jours, la plupart des données de télédétection étant enregistrées en format numérique, presque toutes les interprétations et analyses d'images requièrent une partie de traitement numérique. Le traitement numérique des images peut recourir à divers procédés dont le formatage et la correction des données, le rehaussement numérique pour faciliter l'interprétation visuelle ou même la classification automatique des cibles et des structures entièrement par ordinateur.

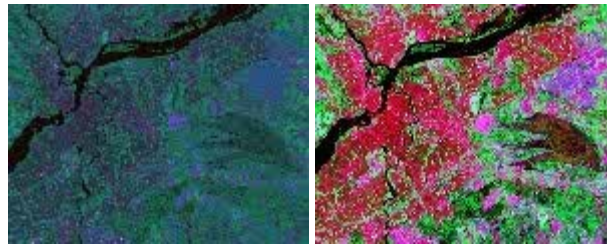
Le traitement numérique de l'imagerie de télédétection exige que les données soient enregistrées et disponibles dans un format numérique convenable pour l'entreposage sur disques ou cassettes informatiques.

Le traitement d'images numériques nécessite évidemment un système informatique (ou **système d'analyse d'images**) ainsi que l'équipement et les logiciels pour traiter les données. Plusieurs systèmes de logiciels commerciaux ont été développés spécifiquement pour le traitement et l'analyse des images de télédétection.

Pour les besoins de ce cours, nous regrouperons les fonctions de traitement des images communément disponibles en analyse d'images en quatre catégories :

1. Prétraitement
2. Rehaussement de l'image
3. Transformation de l'image
4. Classification et analyse de l'image

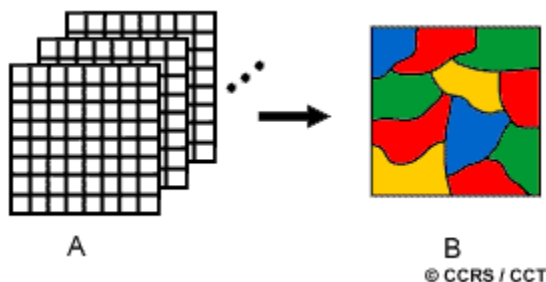
On appelle fonctions de **pré-traitement** les opérations qui sont normalement requises avant l'analyse principale et l'extraction de l'information. Les opérations de pré-traitement se divisent en **corrections radiométriques** et en **corrections géométriques**. Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. Les corrections géométriques comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur, et la transformation des données en vraies coordonnées (par exemple en latitude et longitude) sur la surface de la Terre.



Améliorer l'apparence de l'imagerie

Les fonctions de rehaussement ont pour but d'améliorer l'apparence de l'imagerie pour aider l'interprétation et l'analyse visuelles. Les fonctions de rehaussement permettent **l'étirement des contrastes** pour augmenter la distinction des tons entre les différents éléments d'une scène, et le **filtrage spatial** pour rehausser (ou éliminer) les patrons spatiaux spécifiques sur une image.

Les **transformations d'images** sont des opérations similaires à ceux de rehaussement de l'image. Cependant, alors que le rehaussement de l'image qui est normalement appliqué à une seule bande de données à la fois, la transformation de l'image combine le traitement des données de plusieurs bandes spectrales. Des opérations arithmétiques (c'est-à-dire addition, soustraction, multiplication, division) sont faites pour combiner et transformer les bandes originales en de "nouvelles" images qui montrent plus clairement certains éléments de la scène. Nous allons examiner certaines de ces opérations incluant les diverses méthodes de **rapport de bande** aussi appelé **rapport spectral** et un procédé appelé **analyse des composantes principales** qui est utilisée pour mieux représenter l'information en imagerie multispectrale.



Les opérations de **classification et d'analyse d'image** sont utilisées pour identifier et classer numériquement des pixels sur une image. La classification est habituellement faite sur des banques de données multispectrales (A), et ce procédé donne à chaque pixel d'une image une certaine classe ou thème (B) basé sur les caractéristiques statistiques de la valeur de l'intensité du pixel. Il existe une variété d'approches prises pour faire une classification numérique. Nous allons brièvement décrire deux approches générales qui sont souvent utilisées, soit la classification **supervisée** et la classification **non supervisée**.

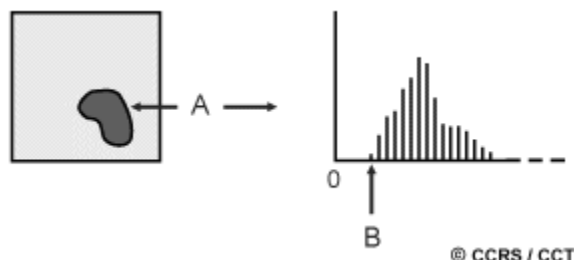
La prochaine section sera consacrée à la description plus détaillée de catégories de fonctions de traitement d'images numériques.

4.4 Traitement

Les opérations de pré-traitement, parfois appelées **restauration et rectification d'image**, sont conçues pour corriger les distorsions géométriques et radiométriques des plates-formes et capteurs spécifiques. Les corrections radiométriques peuvent être nécessaires à cause des variations dans l'illumination et dans la géométrie de visée d'une scène, des conditions atmosphériques, du bruit et de la réponse du capteur. Chacun de ces facteurs variera selon le capteur et la plate-forme utilisés, et selon les conditions d'acquisition des données. Aussi, il peut être souhaitable de convertir et de calibrer les données avec une unité de rayonnement ou réflexion connue (absolue) pour faciliter la comparaison entre les données.



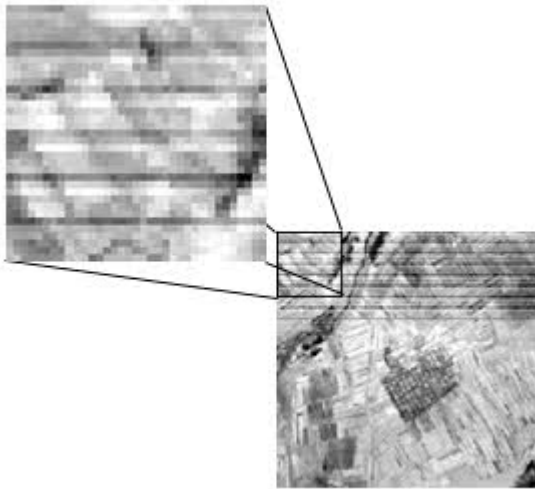
Des variations dans la géométrie d'illumination et de visée entre les images (pour les capteurs optiques) peuvent être corrigées par la modélisation de la relation géométrique et la distance entre les aires de la surface terrestre observées, le Soleil et le capteur. Ceci est souvent requis pour pouvoir faire des comparaisons plus rapides entre des images prises par différents capteurs à différentes dates ou heures, ou pour faire des mosaïques d'images avec un seul capteur en maintenant les conditions d'illumination uniformes d'une scène à l'autre.



Comme nous l'avons vu au chapitre 1, la diffusion du rayonnement se produit quand il passe à travers l'atmosphère et qu'il interagit avec celle-ci. Cette diffusion peut réduire ou **atténuer** une partie de l'énergie illuminant la Terre. De plus, l'atmosphère atténuera aussi le signal se

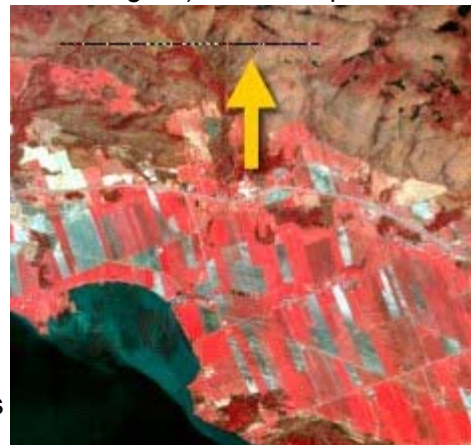
propageant de la cible au capteur.

Diverses méthodes de corrections atmosphériques peuvent être appliquées, allant de modèles très détaillés des conditions atmosphériques durant l'acquisition des données, jusqu'à un simple calcul basé seulement sur les données de l'image. Un exemple de cette dernière méthode consiste à examiner l'intensité observée (valeur numérique du pixel) dans une région ombragée ou un objet très sombre (tel un grand lac clair -A) et à déterminer la valeur minimale (B) pour chacune des bandes spectrales. La correction est appliquée en soustrayant la valeur minimale observée, de tous les pixels dans chaque bande. Puisque la diffusion dépend de la longueur d'onde (chapitre 1), la valeur minimale variera d'une bande à l'autre. Cette méthode est basée sur la supposition que la réflexion de ces éléments est très petite, voire nulle si l'atmosphère est claire. Les valeurs plus petites que zéro que l'on pourrait observer sont dues à la diffusion atmosphérique.



Le bruit dans une image peut être causé par des irrégularités ou des erreurs dans la réponse du capteur, ou par la transmission et l'enregistrement des données. Les formes les plus communes de bruits sont les rayures, le rubanement systématique et les lignes manquantes (B). Ces deux effets devraient être corrigés avant qu'un rehaussement ou une classification ne soient appliqués. Les rayures étaient fréquentes dans les premières données Landsat, à l'époque des six détecteurs MSS, à cause de la variation et de la dérive (voir texte anglais) dans la réponse. La dérive était

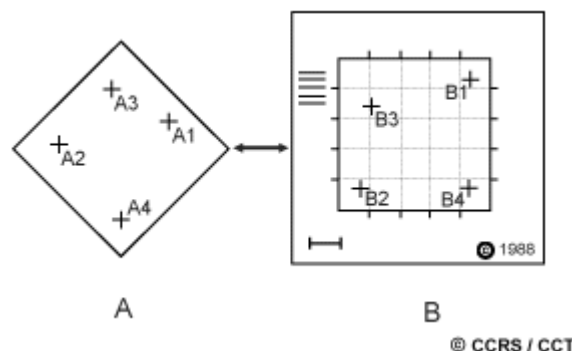
différente pour chacun des six détecteurs, ce qui causait une représentation différente de la même intensité pour chaque détecteur et produisait sur l'image un effet de rayure. Le processus de correction faisait une correction relative de chacun des six capteurs pour amener leurs valeurs apparentes au même niveau. Les lignes manquantes apparaissent quand il y a des erreurs de systèmes qui résultent en l'absence de données ou en données déficientes le long d'une ligne de balayage. Les lignes manquantes sont habituellement 'corrigées' en remplaçant chaque ligne avec la valeur des pixels de la ligne au-dessus ou au-dessous, ou avec la moyenne des deux.



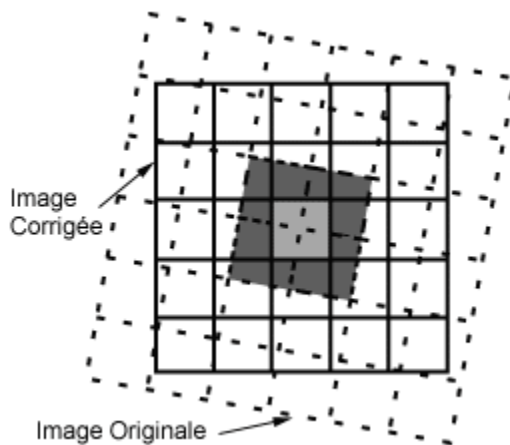
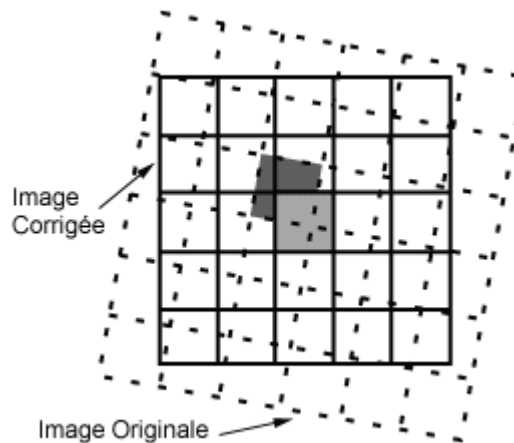
Pour plusieurs applications quantitatives de données de télédétection, il est nécessaire de convertir les nombres en unités représentant la réflectance ou l'émission actuelle de la surface. Ceci se fait en se basant sur les connaissances détaillées de la réponse du capteur

et de la manière dont le signal analogique (c.-à-d. le rayonnement réfléchi ou émis) est converti en un nombre numérique, appelé conversion analogique-à-numérique. En inversant cette opération, le rayonnement absolu peut être calculé pour chaque pixel, de sorte qu'avec le temps, l'on peut effectuer une comparaison précise entre différents capteurs.

À la section 2.10, nous avons vu que toutes les imageries de télédétection sont sujettes à des distorsions géométriques. Ces distorsions peuvent être dues à différents facteurs, notamment la perspective des capteurs optiques, le mouvement du système de balayage, le mouvement de la plate-forme, l'altitude, l'orientation et la vitesse de la plate-forme, le relief du terrain, la courbure et la rotation de la Terre. Les corrections géométriques sont appliquées pour compenser ces distorsions afin que la représentation géométrique de l'imagerie soit aussi proche que possible de la réalité. Plusieurs de ces variations sont systématiques ou prévisibles, et on peut en tenir compte par une modélisation précise du mouvement de la plate-forme et du capteur, et par la relation géométrique entre la plate-forme et la Terre. D'autres erreurs non systématiques, ou aléatoires, ne peuvent pas être modélisées de cette manière et on doit effectuer la correspondance géométrique de l'imagerie à un système connu de coordonnées au sol.



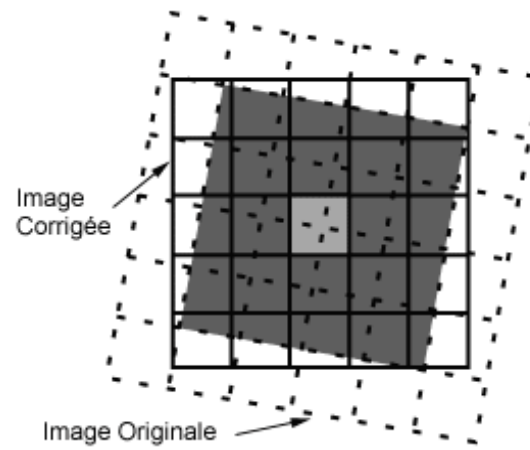
Le processus de correction géométrique consiste à identifier des coordonnées de l'image (c'est-à-dire ligne et colonne) de plusieurs points clairement distincts, appelés **points de contrôle au sol** (PCS), sur l'image à corriger (A - A1 à A4) et à les assortir à leur véritable position en coordonnées au sol (par exemple en latitude et longitude). Les vraies coordonnées au sol sont habituellement mesurées à partir d'une carte (B - B1 à B4), soit sur papier ou en format numérique. Ceci est une correction de type "image-à-carte". Une fois que plusieurs couples de PCS bien distribués ont été identifiés, l'information est traitée par l'ordinateur pour déterminer les équations de transformation à être appliquées aux coordonnées originales (ligne et colonne) pour obtenir les nouvelles coordonnées au sol. La correction géométrique peut aussi être effectuée d'une image à une autre image plutôt qu'à des coordonnées géographiques. Cette méthode s'appelle correction **enregistrement image-à-image**, et on l'utilise souvent avant d'effectuer les différents procédés de transformation qui seront présentés dans la section 4.6.



Pour effectuer une correction géométrique de l'image originale, on applique un procédé appelé **rééchantillonnage** afin de déterminer la valeur numérique à placer dans la nouvelle localisation du pixel de l'image de sortie corrigée. Le processus de rééchantillonnage calcule la nouvelle valeur du pixel à partir de sa valeur originale dans l'image non corrigée. Il existe trois principales méthodes de rééchantillonnage : le **plus proche voisin**, l'**interpolation bilinéaire** et la **convolution cubique**. La méthode du plus proche voisin utilise la valeur numérique du pixel de l'image originale qui se trouve le plus près de

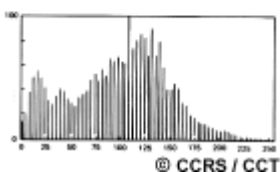
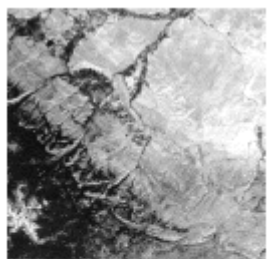
la localisation du nouveau pixel dans l'image corrigée. C'est la méthode la plus simple et elle n'altère pas la valeur originale, mais elle peut produire une duplication des pixels ou une perte de certaines valeurs. Cette méthode a aussi tendance à produire des images bruitées.

L'interpolation bilinéaire prend une moyenne pondérée par la distance des quatre pixels de l'image originale les plus près du nouveau pixel. Le procédé de moyenne altère la valeur originale des pixels et crée une valeur complètement nouvelle sur l'image finale. Ceci peut être nuisible si d'autres procédés, tels que la classification basée sur la réponse spectrale, doivent être faits. Dans ce cas, il peut être préférable d'appliquer le rééchantillonnage après le processus de classification. Le processus de convolution cubique va encore plus loin et calcule la moyenne pondérée par la distance sur un bloc de seize pixels à partir de l'image originale entourant la localisation du nouveau pixel de sortie. Comme pour l'interpolation bilinéaire, cette méthode résulte en de nouvelles valeurs de pixels. Cependant, ces deux méthodes produisent des images à l'apparence plus douce, contrairement à la méthode du plus proche voisin.

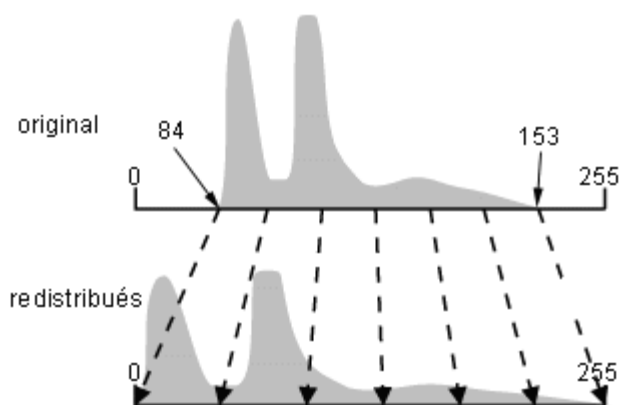


4.5 Rehaussement des images

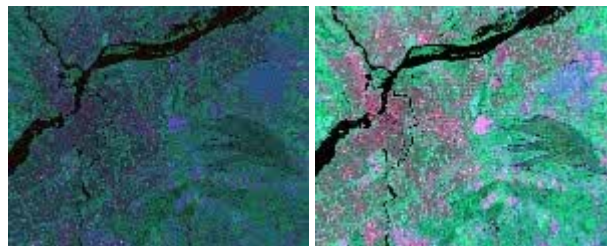
On applique le rehaussement des images afin de faciliter l'interprétation visuelle et la compréhension des images. Les images numériques ont l'avantage de nous permettre de manipuler assez facilement les valeurs enregistrées pour chaque pixel. Même s'il est possible d'effectuer les corrections radiométriques pour les effets de l'illumination solaire, les conditions atmosphériques et les caractéristiques des instruments utilisés avant de distribuer les images aux usagers, il peut s'avérer que l'image ne soit pas à son meilleur pour l'interprétation visuelle. Les systèmes de télédétection, et spécialement ceux qui utilisent une plate-forme spatiale, doivent être conçus de façon à pouvoir traiter les différents niveaux d'énergie propres aux cibles et à leur environnement, susceptibles d'être rencontrés dans une utilisation normale. Cette variation importante dans la réponse spectrale des différents types de cibles (ex. : forêt, désert, neige, eau, etc.) rend impossible l'application d'une correction radiométrique générale capable d'optimiser le contraste et les niveaux d'intensité dans chacune des conditions. Il faut donc faire un ajustement différent des tons en fonction de l'utilisation et de l'état de chacune des images.



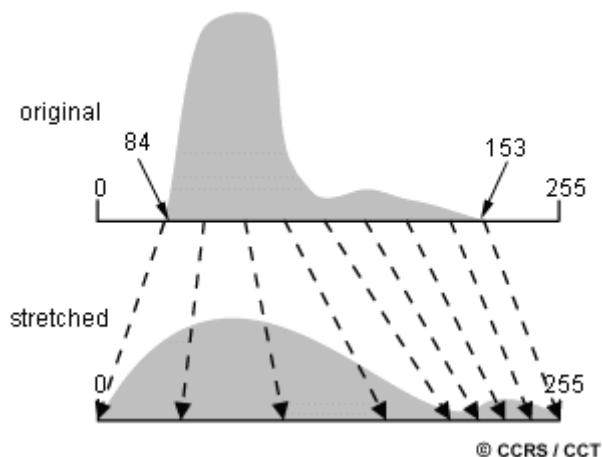
Dans une image brute, les informations utiles sont souvent contenues dans un ensemble restreint de valeurs numériques parmi les valeurs possibles (256 dans le cas de données à 8 bits). Le rehaussement des contrastes se fait en changeant les valeurs initiales de façon à utiliser toutes les valeurs possibles, ce qui permet d'augmenter le contraste entre les cibles et leur environnement. Pour bien comprendre comment fonctionne ce type de rehaussement, il faut premièrement comprendre le concept de l'histogramme d'une image. Un histogramme est une représentation graphique des valeurs numériques d'intensité qui composent une image. Ces valeurs (de 0 à 255 pour des données à 8 bits) apparaissent le long de l'axe des x du graphique. La fréquence d'occurrence de chacune de ces valeurs est présentée le long de l'axe des y.



En manipulant la distribution des niveaux d'intensité (appelés aussi les tons de gris) dont l'histogramme est la représentation graphique sur l'ensemble des valeurs admissibles pour une image, il est possible de produire différents types de rehaussement. Il existe plusieurs méthodes qui permettent de rehausser le contraste et les détails d'une image. Nous n'en décrivons que quelques-unes. La méthode la plus simple est un rehaussement linéaire du contraste. Afin d'appliquer cette méthode, on identifie les limites supérieures et inférieures d'intensité représentées sur l'histogramme (les valeurs minimales et maximales), et à l'aide d'une transformation linéaire, on étire ces valeurs sur l'ensemble des valeurs disponibles. Dans notre exemple, la valeur minimale des données initiales dans l'histogramme est de 84 et la valeur maximale est de 153. Ces 70 niveaux n'occupent qu'un tiers des 256 valeurs disponibles. Un rehaussement linéaire étire de façon uniforme cet intervalle afin d'utiliser la totalité des valeurs de 0 à 255. Ce procédé rehausse le contraste dans l'image en pâlisant davantage les régions claires de l'image et en assombrissant davantage les régions plus foncées. Ceci facilite l'interprétation visuelle. Le graphique suivant montre l'augmentation du contraste dans une image avant (image du haut) et après (image du bas) un rehaussement linéaire.



L'augmentation du contraste dans une image avant (image du haut) et après (image du bas) un rehaussement linéaire

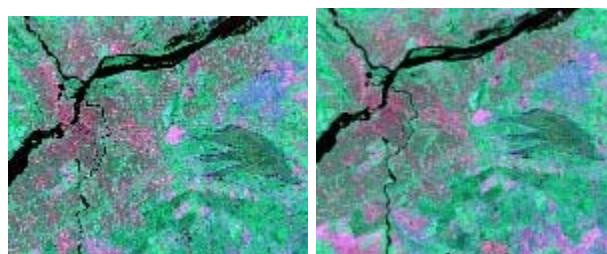
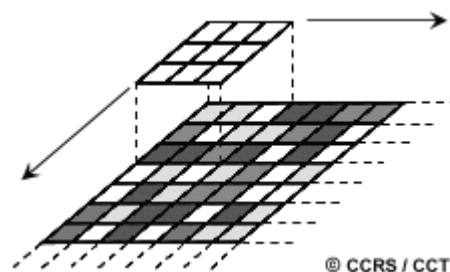


Un étirement uniforme des valeurs initiales sur l'ensemble des valeurs disponibles n'est pas toujours approprié, particulièrement lorsque la distribution initiale n'est pas uniforme. Dans certains cas, un étirement pondéré de l'histogramme peut donner de meilleurs résultats. Cette méthode assigne un intervalle de valeurs plus grand dans les portions de l'histogramme pour lesquelles les valeurs d'intensité ont une fréquence plus élevée. De cette façon, les détails de ces régions seront mieux rehaussés que les détails des régions pour lesquelles la fréquence des valeurs d'intensité de

l'histogramme est plus faible. Dans d'autres cas, il peut être préférable de rehausser le contraste dans une portion spécifique de l'histogramme. Par exemple, supposons que dans l'image de l'embouchure d'une rivière, les régions où il y a de l'eau occupent les valeurs numériques dans l'intervalle de 40 à 76. Pour rehausser les détails de l'eau, pour voir les

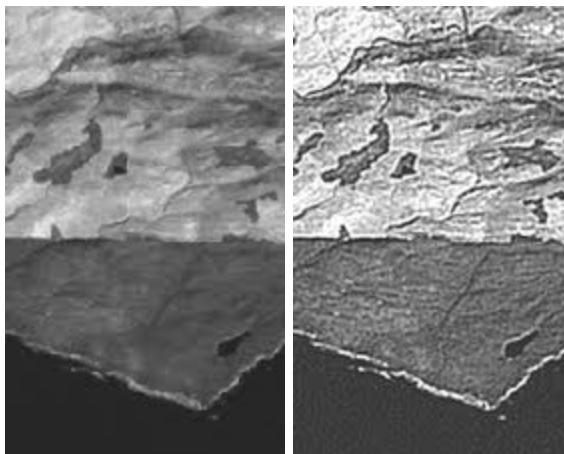
variations dans la quantité de sédiments en suspension par exemple, nous pourrions étirer cette petite portion de l'histogramme représentant l'eau (40 à 76) sur l'ensemble des valeurs disponibles (0 à 255). Tous les autres pixels ayant des valeurs d'intensité initiales plus grandes que 76 auront une valeur de 255 et ceux ayant des valeurs d'intensité inférieures à 40 auront une valeur de 0. Les détails dans les autres régions de l'histogramme seront donc perdus. Cependant, les détails sur l'eau seront grandement rehaussés.

Les **filtres spatiaux** représentent une autre méthode de traitement numérique utilisées pour le rehaussement d'une image. Ces filtres sont conçus de façon à faire ressortir ou à supprimer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur **fréquence spatiale**. La fréquence spatiale est liée au concept de texture dont nous avons discuté à la section 4.2. Elle fait référence à la fréquence de variation des différents tons qui apparaissent dans une image. Les régions d'une image où la texture est "rugueuse" sont les régions où les changements dans les tons sont abrupts; ces régions ont une fréquence spatiale élevée. Les régions "lisses" ont une variation des tons qui est plus graduelle sur plusieurs pixels; ces régions ont une fréquence spatiale faible. La méthode de filtrage spatial consiste à déplacer une "fenêtre" d'une dimension de quelques pixels (ex. : 3 sur 3, 5 sur 5, etc.) au-dessus de chaque pixel de l'image. On applique alors un traitement mathématique utilisant les valeurs des pixels sous la fenêtre et on remplace la valeur du pixel central par le résultat obtenu. La fenêtre est déplacée le long des colonnes et des lignes de l'image, un pixel à la fois, répétant le calcul jusqu'à ce que l'image entière ait été filtrée. En modifiant le calcul effectué à l'intérieur de la fenêtre, il est possible de rehausser ou de supprimer différents types de caractéristiques présents dans une image.



Un filtre passe-bas est conçu afin de mettre en évidence les régions assez grandes et homogènes ayant des pixels d'intensité similaire. Ce filtre réduit les plus petits détails d'une image. Il est donc utilisé pour lisser une image. Les filtres moyenneur et médian, souvent utilisés avec les images radars (nous les avons décrits au chapitre 3), sont des exemples de filtre passe-bas. Les **filtres passe-haut** font le contraire : ils sont utilisés pour raviver les petits détails d'une image. Un filtre passe-haut peut par exemple se définir en appliquant premièrement un filtre passe-bas à une image pour ensuite soustraire le résultat de l'image originale, ce qui produit une nouvelle image dans laquelle les détails ayant une fréquence

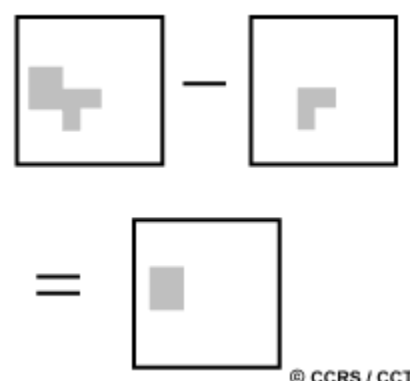
spatiale élevée sont rehaussés. Les filtres directionnels ou les filtres détectant les contours sont utilisés pour rehausser les caractéristiques linéaires d'une image comme les routes ou les limites des champs. Ces filtres peuvent aussi être conçus pour rehausser des caractéristiques ayant une certaine orientation dans l'image. Ces filtres ont de nombreuses applications en géologie pour la détection de structures géologiques linéaires.



4.6 Transformation des images

La transformation d'images est un procédé qui implique la manipulation de plusieurs bandes de données, que ce soit pour transformer une image provenant d'un capteur multispectral ou pour transformer plusieurs images de la même région prises à des moments différents (données multitemporelles). La transformation d'images génère une "nouvelle" image en combinant les différentes sources d'information de manière à rehausser certaines caractéristiques ou certaines propriétés des données qui sont moins évidentes dans l'image originale.

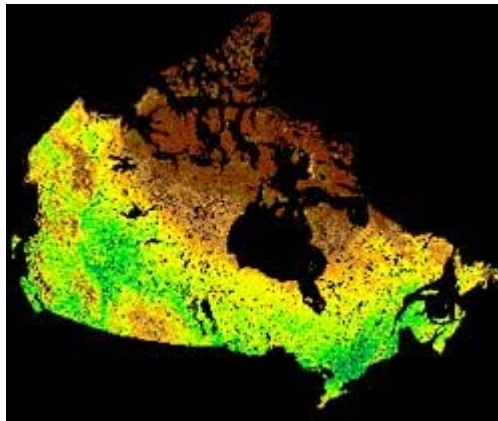
Les transformations de base font usage d'opérations arithmétiques simples. La soustraction d'images est souvent utilisée pour identifier les changements qui sont survenus entre des images obtenues à des dates différentes. Pour ce faire, on utilise deux images qui sont liées géométriquement (voir section 4.4) que l'on soustrait en enlevant les valeurs d'intensité de chaque pixel d'une image (1) aux valeurs d'intensité de chaque pixel correspondant dans l'autre image (2). Une mise à l'échelle peut ensuite être faite (3) en additionnant une valeur constante (127 dans le cas présent) à chaque pixel résultant de la soustraction. Dans une telle image, les régions pour lesquelles il y a eu peu ou pas de changement (A) entre les deux images originales, auront des valeurs d'intensité autour de 127 (tons de gris moyen). Par contre, les régions qui ont subi un changement significatif (B) auront des valeurs d'intensité inférieures ou supérieures à 127, donc des tons plus pâles ou plus foncés, selon la "direction" du changement de la réflectance entre les deux images. Cette transformation peut être utile pour identifier les zones où le développement urbain a changé la surface ou pour identifier des zones de déforestation.



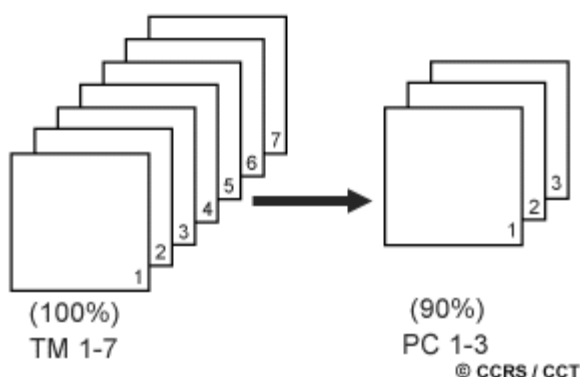
© CCRS / CCT

La division d'image ou le calcul de **rapports spectraux** est aussi une transformation d'images très commune. La division d'image permet de rehausser des variations subtiles dans la réponse spectrale de différents types de surface. L'image qui résulte du calcul des rapports entre les données provenant de deux bandes spectrales différentes, présente un rehaussement des variations, la pente des courbes de réflectance spectrale, entre les deux bandes spectrales qui pourraient autrement être masquées par la variation dans l'intensité de leurs pixels. L'exemple qui suit illustre le concept des rapports spectraux. La végétation réfléchit fortement dans le proche infrarouge lorsqu'elle est en santé et absorbe fortement dans la portion du spectre électromagnétique du rouge visible. Les autres types de surface comme la terre et l'eau ont des réflexivités presque égales dans ces deux zones du spectre. Une image des rapports spectraux entre les images de la bande 7 (proche infrarouge, 0,8 à 1,1 micron) divisée par la bande 5 (rouge, 0,6 à 0,7 micron) des données de Landsat MSS aurait des valeurs beaucoup plus grandes que 1,0 pour la végétation et des rapports autour de 1.0 pour la terre et l'eau. Il est donc facile de faire la différence entre la végétation et les autres types de surface en utilisant cette transformation. Ce type de transformation nous

permet aussi d'identifier des régions où la végétation subit un stress et n'est pas saine, car ces régions ont une réflectance plus basse dans le proche infrarouge, et le rapport spectral est plus faible que celui des régions où la végétation est en santé.



Un autre avantage de l'utilisation des rapports spectraux est la réduction de l'effet de variation de l'illumination solaire causé par la topographie. Le simple fait de calculer des valeurs relatives (des rapports) plutôt que des valeurs absolues d'intensité produit cette réduction des effets topographiques. Par exemple, la réflectance absolue d'une forêt couvrant une montagne dépend de son orientation par rapport à l'illumination du Soleil. Cependant, le rapport entre la réflectivité provenant des deux bandes spectrales est sensiblement le même. Des rapports plus complexes entre des sommes et des différences de bandes spectrales ont été développés pour différents capteurs afin de surveiller les conditions de la végétation. Une transformation très utilisée pour surveiller l'état de la végétation à l'échelle continentale et à l'échelle du globe est l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Cette transformation utilise les données des radiomètres avancés à haute résolution (AVHRR) à bord des satellites NOAA (voir chapitre 2, section 2.11).

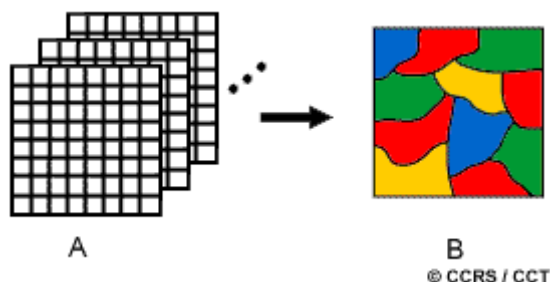


Les données de bandes multispectrales différentes ont souvent une corrélation très élevée et contiennent de l'information similaire. Par exemple, les capteurs de la bande 4 et 5 de Landsat MSS (vert et rouge respectivement) produisent des images d'apparence visuelle très semblable étant donné que la réflectance pour le même type de surface est presque identique. Des transformations d'images basées sur des traitements statistiques complexes des

données multispectrales peuvent être utilisées pour réduire la redondance des données et la corrélation entre les bandes. L'analyse des composantes principales est une transformation de ce genre. Le but de cette transformation est de réduire le nombre de dimensions (nombre de bandes) et de produire une compression de l'information de plusieurs bandes dans un

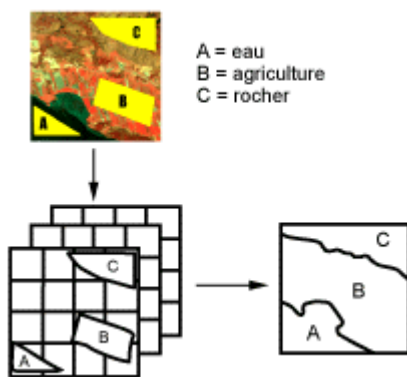
nombre plus restreint de bandes. Les "nouvelles" bandes qui résultent de cette compression statistique sont appelées composantes. Ce procédé vise à maximiser (statistiquement) la quantité d'information (ou variance) des données originales dans un nombre restreint de composantes. Par exemple, l'analyse des composantes principales, peut transformer des données provenant de sept bandes du capteur TM/Landsat (Thematic Mapper) de façon à ce que les trois principales composantes de la transformation contiennent plus de 90% de l'information contenue dans les sept bandes initiales. L'interprétation et l'analyse de ces trois composantes, en les combinant visuellement ou numériquement, est plus simple et plus efficace que l'utilisation des sept bandes initiales. L'analyse des composantes principales ou d'autres transformations complexes peuvent être utilisées comme techniques de rehaussement visuel pour faciliter l'interprétation ou pour réduire le nombre de bandes qui seront fournies comme données d'entrée à une procédure de classification numérique. Ces procédures sont décrites dans la prochaine section.

4.7 Classification et analyse des images



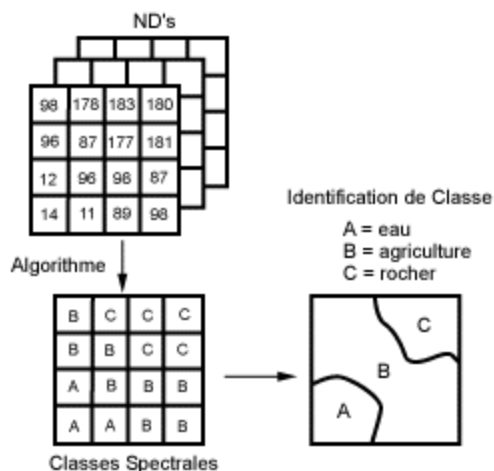
Un analyste qui tente de classer les caractéristiques d'une image, utilise les éléments de l'interprétation visuelle (discutés à la section 4.2) pour identifier des groupes homogènes de pixels qui représentent des classes intéressantes de surfaces. La classification numérique des images utilise l'information spectrale contenue dans les valeurs d'une ou de plusieurs bandes spectrales pour classer chaque pixel individuellement. Ce type de classification est appelé reconnaissance de **regroupements spectraux**. Les deux façons de procéder (manuelle ou automatique) ont pour but d'assigner une classe particulière ou **thème** (par exemple : eau, forêt de conifères, maïs, blé, etc.) à chacun des pixels d'une image. La "nouvelle" image qui représente la classification est composée d'une mosaïque de pixels qui appartiennent chacun à un thème particulier. Cette image est essentiellement une représentation thématique de l'image originale.

Lorsqu'on parle de classes, il faut faire la distinction entre des classes d'information et des classes spectrales. Les **classes d'information** sont des catégories d'intérêt que l'analyste tente d'identifier dans les images, comme différents types de cultures, de forêts ou d'espèce d'arbres, différents types de caractéristiques géologiques ou de roches, etc. Les **classes spectrales** sont des groupes de pixels qui ont les mêmes caractéristiques (ou presque) en ce qui a trait à leur valeur d'intensité dans les différentes bandes spectrales des données. L'objectif ultime de la classification est de faire la correspondance entre les classes spectrales et les classes d'information. Il est rare qu'une correspondance directe soit possible entre ces deux types de classes. Des classes spectrales bien définies peuvent apparaître parfois sans qu'elles correspondent nécessairement à des classes d'information intéressantes pour l'analyse. D'un autre côté, une classe d'information très large (par exemple la forêt) peut contenir plusieurs **sous-classes** spectrales avec des variations spectrales définies. En utilisant l'exemple de la forêt, les sous-classes spectrales peuvent être causées par des variations dans l'âge, l'espèce, la densité des arbres ou simplement par les effets d'ombrage ou des variations dans l'illumination. L'analyste a le rôle de déterminer de l'utilité des différentes classes spectrales et de valider leur correspondance à des classes d'informations utiles.



Les méthodes de classification les plus communes peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes de **classification supervisée** et les méthodes de **classification non supervisée**. Lors de l'utilisation d'une méthode de classification supervisée, l'analyste identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information). Ces échantillons forment un **ensemble de données-tests**. La sélection de ces données-tests est basée sur les connaissances de l'analyste, sa familiarité avec les régions géographiques et les types de surfaces

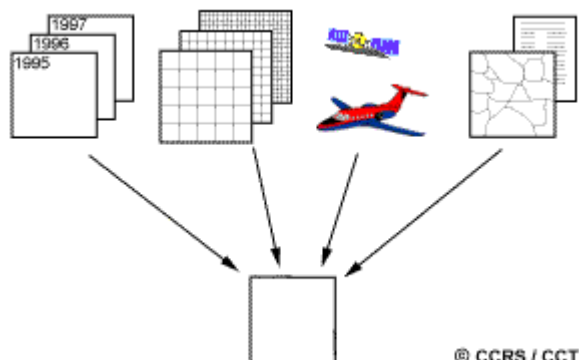
présents dans l'image. L'analyste supervise donc la classification d'un ensemble spécifique de classes. Les informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées pour que l'ordinateur puisse définir les classes et ensuite reconnaître des régions aux propriétés similaires à chaque classe. L'ordinateur utilise un programme spécial ou algorithme afin de déterminer la "signature" numérique de chacune des classes. Plusieurs algorithmes différents sont possibles. Une fois que l'ordinateur a établi la signature spectrale de chaque classe à la classe avec laquelle il a le plus d'affinités. Une classification supervisée commence donc par l'identification des classes d'information qui sont ensuite utilisées pour définir les classes spectrales qui les représentent.



La classification non supervisée procède de la façon contraire. Les classes spectrales sont formées en premier, basées sur l'information numérique des données seulement. Ces classes sont ensuite associées, par un analyste, à des classes d'information utile (si possible). Des programmes appelés **algorithmes de classification** sont utilisés pour déterminer les groupes statistiques naturels ou les structures des données. Habituellement, l'analyste spécifie le nombre de groupes ou classes qui seront formés avec les données. De plus, l'analyste peut spécifier certains paramètres relatifs à la distance entre les classes et la

variance à l'intérieur même d'une classe. Le résultat final de ce processus de classification itératif peut créer des classes que l'analyste voudra combiner, ou des classes qui devraient être séparées de nouveau. Chacune de ces étapes nécessite une nouvelle application de l'algorithme. L'intervention humaine n'est donc pas totalement exempte de la classification non supervisée. Cependant, cette méthode ne commence pas avec un ensemble prédéterminé de classes comme pour la classification supervisée.

4.8 Intégration des données et analyse



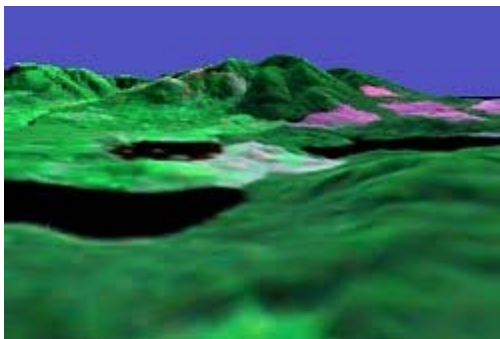
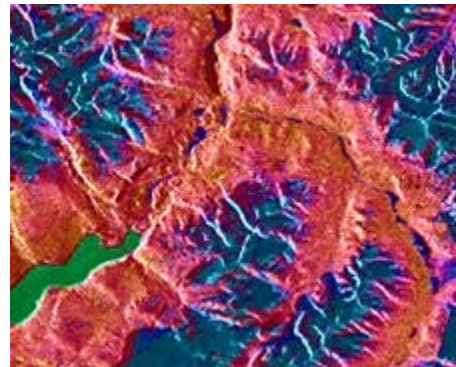
Dans les premières années de la télédétection, quand toutes les données provenaient de photographies aériennes, la possibilité d'intégrer des données de différentes sources était plutôt limitée. Aujourd'hui, la plupart des données, provenant de divers capteurs, sont disponibles en format numérique, ce qui fait de l'intégration des données une méthode commune pour l'interprétation et l'analyse. L'intégration des données est une méthode qui implique la combinaison de données provenant de différentes sources afin d'en extraire une plus grande quantité et une meilleure qualité d'information. Les données combinées peuvent inclure des données multitemporelles, des données de plusieurs résolutions, des données de plusieurs capteurs et des données de plusieurs types.



L'intégration des données multitemporelles a déjà été présentée à la section 4.6 lorsque nous avons discuté de la soustraction d'image. Les images acquises à des heures différentes sont intégrées ensemble afin d'identifier les zones de changement. La détection de changements multitemporels peut être effectuée à l'aide de méthodes simples, comme cette dernière, ou à l'aide d'approches plus complexes comme des comparaisons de classifications multiples ou des classifications utilisant des ensembles de données multitemporelles intégrées. L'intégration de données à plusieurs

résolutions est utile dans plusieurs champs d'activités. La combinaison de données à plus haute résolution avec des données à résolution plus faible peut augmenter de façon significative le nombre de détails spatiaux dans une image et peut rehausser certaines caractéristiques de l'image. Les **données SPOT** se prêtent bien à une telle méthode puisque les données panchromatiques à 10 mètres peuvent facilement être combinées aux données multispectrales à 20 mètres. De plus, dans ce cas, les données multispectrales retiennent une bonne résolution spectrale, tandis que les données panchromatiques permettent d'augmenter la résolution spatiale de l'image.

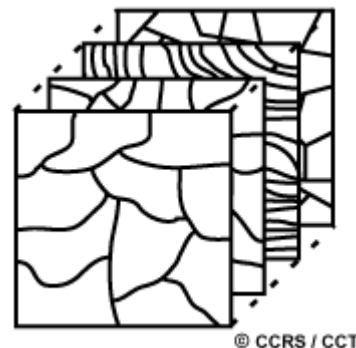
Les données provenant de plusieurs capteurs peuvent aussi être combinées, ce qui nous amène à introduire le concept de la fusion de données multicapteurs. La combinaison de données optiques multispectrales à des images radars est un très bon exemple de cette technique. Ces deux types de représentations spectrales de la surface présentent des informations complémentaires. Les données optiques fournissent une information spectrale détaillée, utile pour faire la différence entre deux types de surfaces, tandis que les images radars mettent en évidence les détails structuraux de la surface.



L'intégration de données provenant de différents capteurs exige que les données soient géométriquement liées entre elles ou à des coordonnées géographiques communes. Ceci permet aussi d'intégrer des **données d'autres sources** aux données de télédétection. Par exemple, des données sur l'élévation de la topographie sous forme numérique, appelées modèle d'élévation numérique ou **modèle numérique d'altitude (MEN/MNA)**, peuvent être

utiles lors de la classification. Les MNA peuvent aider à corriger les effets causés par la topographie et par les variations dans la pente du terrain, ce qui peut augmenter la précision de la classification résultante. Les MNA sont aussi utiles pour produire des images avec une perspective en trois dimensions. L'image obtenue par télédétection est alors superposée aux données d'élévation, ce qui augmente la capacité de visualisation de l'image.

La combinaison des données de différentes sources et de différents types que nous venons de décrire, ne constitue que la pointe de l'iceberg pour l'intégration de données et l'analyse. Dans un environnement numérique, où toutes les sources de données sont géométriquement liées à une base géographique commune, le potentiel pour l'extraction de l'information est très grand. Ceci définit le principe de l'analyse numérique dans un **système d'information géographique (SIG)**. Toutes les données qui peuvent être repérées dans un système de coordonnées géographiques communes sont susceptibles d'être utilisées dans ce type d'environnement. Un MEN n'est qu'un exemple de ce type de données. Des cartes de types de sols, de classes de surfaces, de types de forêts, du réseau routier, etc. en sont des exemples parmi tant d'autres. Il est



aussi possible d'utiliser dans un SIG, le résultat d'une classification de données de télédétection sous forme de carte afin de faire la mise à jour des cartes existantes. En résumé, l'analyse de diverses sources de données combinées permet d'en extraire de meilleures et plus précises informations. On profite donc d'une synergie entre les types de données. Les utilisations et le potentiel de cette analyse sont incalculables. Dans le prochain et dernier chapitre, nous présenterons des exemples d'utilisation des données de télédétection où plusieurs de ces exemples font usage de l'intégration de données de plusieurs sources.



4. Notes finales

4.9 Notes finales

Vous venez de compléter le **Chapitre 4 - Interprétation des images et analyse**. Vous pouvez poursuivre avec le Chapitre 5 - Applications ou aller fureter sur le site Web du CCT où vous trouverez d'autres articles sur l'interprétation et l'analyse des images.

En furetant parmi les « [Images du Canada](#) »¹, vous pourrez apprendre une foule de détails sur les éléments visuels d'interprétation et vous aurez accès à une variété de questions (...et de réponses !)sur la télédétection.

Nous avons un cours [téléchargeable](#)² et des **exercices sur des images numériques et des techniques d'analyse numériques qui constituent un excellent début pour se familiariser à la télédétection**.

Voyez comment on utilise la transformé en Intensité, Teinte et Saturation (ITS) pour [visualiser les formes du terrain en 3D](#)³. De plus, la transformé ITS peut être utilisée pour effectuer la fusion de différents types de données. Dans cet exemple, on l'utilise pour étudier [l'hydrogéologie](#)⁴ d'une région. La [fusion d'images](#)⁵ de différents capteurs est très éloquent sur cette image de la région de la capitale du Canada - Ottawa.

La compression d'images est une technique importante pour l'archivage et la transmission de grandes images. Une technique mise au point au CCT utilise une [méthode multi-échelles](#)⁶ pour compresser les images et réduire la dimension des fichiers.

Vous pourrez prendre connaissance d'une multitude d'autres techniques de manipulation et d'interprétation d'images qui sont démontrées sur le site Web du CCT. Vous pourrez également consulter notre glossaire de télédétection sous la rubrique « [techniques](#) ».

¹http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tour/index_f.php

²http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/digitech/index_f.php

³http://ccrs.nrcan.gc.ca/radar/ana/chromo_f.php

⁴http://ccrs.nrcan.gc.ca/radar/spaceborne/radarsat1/action/int/jor/rjor04_f.php

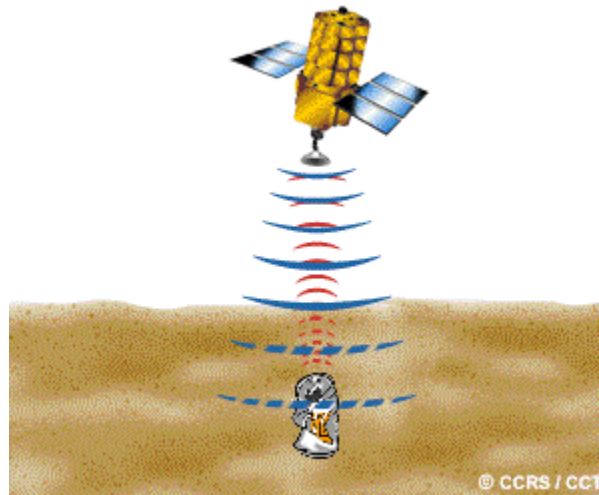
⁵http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tour/06/index_f.php

⁶http://ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_f.php



4. Saviez vous que...?

4.2 Saviez vous que...?

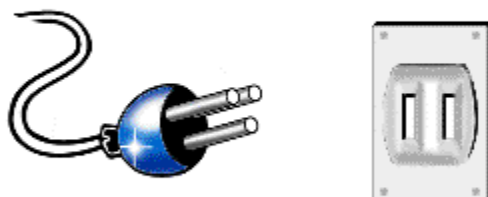


« ...Qu'est ce qu'ils vont encore inventer?!... »

La télédétection (interprétation d'images) a été utilisée pour l'investigation archéologique. Parfois, les empreintes d'artefacts, telles que les anciennes fondations de forts laissées sur la surface, peuvent être détectées et identifiées. Puisque cette empreinte sur la surface est habituellement très subtile, il est donc avantageux de connaître la région et la nature des structures recherchées. Il est aussi préférable d'avoir une surface qui n'a pas été trop dérangée par les activités humaines.

4.3 Saviez-vous que...?

« ...Notre processus opérationnel standard est... »

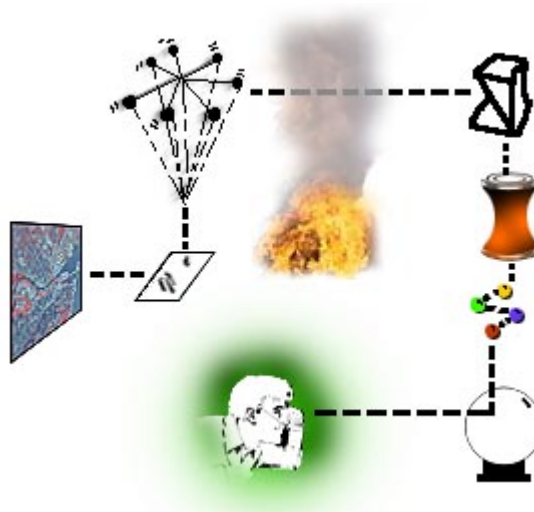


© CCRS / CCT

... L'industrie de la télédétection et les autres industries qui lui sont associées ont tenté d'uniformiser le format dans lequel les données de télédétection sont stockées afin de faciliter l'échange de données et d'établir un standard pour la lecture de ces données est faite par les systèmes d'analyse d'images. Le comité CEOS (Committee on Earth Observing Satellites) a suggéré ce format qui est grandement utilisé à travers le monde pour l'enregistrement et l'échange de données.

4.5 Le saviez-vous?

Le rehaussement d'images est essentiellement un processus qui permet de faciliter l'interprétation visuelle d'une image. Dans certains cas (comme lors d'un filtrage passe-bas), le résultat peut paraître décevant mais il permet toutefois à l'interprète de discerner les éléments de basse fréquence spatiale parmi le fouillis des hautes fréquences de l'image. Les rehaussements sont souvent appliqués pour des raisons spécifiques. Ainsi, pour une image donnée, ils pourront être forts différents s'il s'agit d'applications différentes.



4.7 Saviez-vous que...?

« ...Cette image a une belle texture, qu'en pensez-vous?... »



...La texture a été identifiée comme étant un élément clé de l'interprétation visuelle (section 4.2), particulièrement dans l'interprétation des images radars. Des algorithmes de classification des textures numériques sont aussi disponibles et peuvent être une alternative (ou un complément) à la classification spectrale. Ces algorithmes fonctionnent de façon semblable à l'application d'un filtre spatial ; des calculs sont effectués sur les données d'une image se retrouvant sous une « fenêtre » qui se déplace ensuite jusqu'à ce que l'image entière soit traitée. Ces calculs servent à estimer la « texture » de l'image en fonction de la variabilité des valeurs numériques des pixels sous la fenêtre. Plusieurs mesures de la texture peuvent être faites afin de faire la différence entre les caractéristiques et définir les propriétés de la texture de l'image.



4. Questions éclairs et réponses

4.2 Questions éclairs



Regardez la photographie aérienne ci-dessous. Identifiez les structures suivantes dans l'image et expliquez comment vous avez fait en vous basant sur les éléments d'interprétation visuelle décrits dans cette section.

- piste de course
- rivière
- routes
- ponts
- quartier résidentiel
- barrage.

4.2 Réponses questions éclairs

- La piste de course dans le coin inférieur gauche de l'image est très facile à identifier grâce à sa forme caractéristique.
- La rivière est aussi facile à identifier de par sa forme et son contraste de ton avec son entourage.
- Les routes sur l'image sont visibles grâce à leur forme (rectiligne dans la plupart des cas) et à leur ton généralement plus clair par rapport aux autres structures.
- Les ponts sont identifiables en se basant sur leur forme, leur ton, et en association avec la rivière (- ils passent au-dessus de celles-ci).
- Les quartiers résidentiels sur le côté gauche de l'image et dans la partie droite supérieure peuvent être identifiés par le patron qu'ils font par rapport aux routes. Les habitations et les autres bâtiments peuvent aussi être identifiés par des tons clairs et sombres.
- Le barrage sur la rivière, au centre supérieur de l'image, peut être identifié grâce à son contraste avec la rivière sombre, sa forme, et par association avec la rivière (à quel autre endroit pourrait-on trouver un barrage !).

4.3 Question éclair

Un pixel 8 bits occupe un espace d'un octet sur un disque informatique. Un kilo-octet (ko) représente 1024 octets. Un mega-octet (Mo) représente 1024 kilo-octets. De combien de mega-octets un disque d'ordinateur aurait-il besoin pour contenir une image 8 bits (7 bandes) du satellite Landsat Thematic Mapper (TM) qui a une dimension de 6000 pixels par 6000 lignes?



4.3 Réponses questions éclairs



Si nous avons sept bandes de données TM, chacune avec 6000 pixels par 6000 lignes, et que chaque pixel occupe un octet d'espace disque, nous avons :

$$7 \times 6000 \times 6000 = 252\,000\,000 \text{ octets de données.}$$

Pour convertir ceci en kilo-octets, on divise par 1024, et pour convertir la réponse en mega-octets, on divise une autre fois par 1024!

$$252\,000\,000 (1024 \times 1024) = 240,33 \text{ mega-octets}$$

Donc, nous aurions besoin de 240 mega-octets d'espace disque juste pour contenir une seule image TM complète, sans analyser l'imagerie et créer des variations d'images. Il est inutile de dire qu'il faut beaucoup d'espace et des ordinateurs puissants pour analyser les données provenant des systèmes de télédétection d'aujourd'hui.

4.4 Question éclair



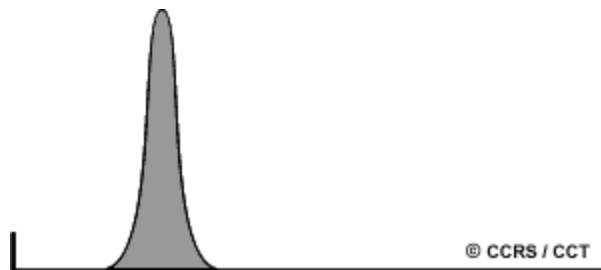
Quel est l'avantage d'appliquer une correction géométrique à une image en fonction des coordonnées géographiques avant de commencer à interpréter et analyser ses données?

4.4 Réponses questions éclairs



L'avantage d'appliquer une correction géométrique à une image avant de l'analyser et de l'interpréter est qu'une image corrigée permet de mesurer les distances et la superficie des caractéristiques de l'image. Ceci est particulièrement pratique pour différentes utilisations des images où des mesures assez précises sont nécessaires, comme dans le domaine de la cartographie des milieux urbains. De plus, les coordonnées géographiques des caractéristiques peuvent ainsi être déterminées. Quand une image est liée géométriquement à des coordonnées géographiques connues, elle peut être combinée avec d'autres données de sources numériques. Nous aborderons ce concept de l'intégration de l'information à la section 4.8.

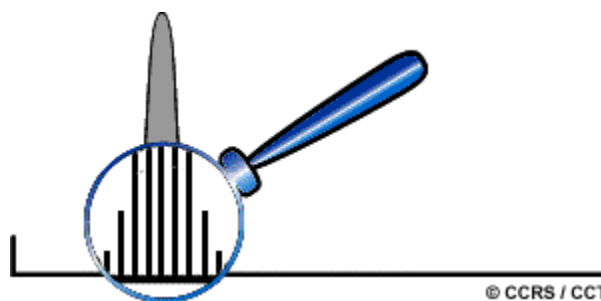
4.7 Question éclair



Supposez que vous vouliez effectuer une classification sur les données d'une image satellitaire. Cependant, lorsque vous regardez l'histogramme de l'image, vous vous apercevez que toutes les données utiles sont réparties sur un intervalle restreint de valeurs. Serait-il bon d'effectuer un rehaussement linéaire du contraste avant de commencer la classification?

4.7 Réponses questions éclairs

Le rehaussement d'une image est utilisé exclusivement pour pouvoir apprécier et analyser visuellement une image. Un rehaussement n'ajoutera rien d'utile du point de vue de la classification d'une image. Voici une autre façon d'expliquer cette réponse : si deux pixels ont une valeur numérique d'intensité séparée par un seul niveau, il est difficile de faire la différence à l'oeil nu entre les deux pixels.



Cependant, pour un ordinateur, cette différence de 1 est aussi évidente qu'une différence de 100. L'image rehaussée peut aider l'analyste à sélectionner les groupes-tests à l'oeil, mais la classification sera effectuée sur les données initiales non rehaussées.



5. Applications

5.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre qui traite des capteurs (chapitre 2), chaque capteur est conçu pour des applications spécifiques. Les bandes spectrales acquises par un capteur optique déterminent les applications pour lesquelles il sera utile. Quant au capteur radar, ce sont l'angle d'incidence et la fréquence utilisés qui en déterminent l'utilisation.

Pour chaque application, il existe une combinaison spécifique de résolutions spectrale, spatiale et temporelle. Revoyons ces trois types de résolutions.



La résolution spectrale fait référence à la largeur ou l'étendue de chaque bande enregistrée. Par exemple, les images panchromatiques, qui captent une grande étendue de toutes les longueurs d'ondes visibles, ne sont pas aussi sensibles au stress de la végétation que les images utilisant une bande étroite dans l'infrarouge, la chlorophylle absorbant fortement le rayonnement infrarouge.

La résolution spatiale fait référence au détail perceptible dans une image. La cartographie détaillée des marécages requiert une résolution spatiale beaucoup plus détaillée que la cartographie de régions physiographiques.

La résolution temporelle fait référence au laps de temps écoulé entre deux images. Plusieurs applications (la surveillance de feux de forêt, un déversement d'hydrocarbures ou le mouvement de la glace océanique) nécessitent des images répétitives, prises avec la plus grande fréquence possible. Certaines autres applications (identification de récoltes, invasion d'insectes et surveillance des marécages) demandent des images saisonnières, tandis que

d'autres, comme la cartographie des structures géologiques, demandent une seule série d'images. Les applications où le temps est un facteur important nécessitent un traitement et une livraison rapides des images pour permettre aux utilisateurs d'en retirer l'information le plus rapidement possible.

Dans le cas où des images répétitives sont nécessaires, le cycle de passage du capteur (la période de temps écoulée avant qu'il ne repasse au-dessus d'un même point) et sa fiabilité sont très importants pour l'obtention de données valables. Les capteurs optiques sont limités dans les environnements nuageux où les cibles sont souvent difficiles à voir. Dans certaines régions, particulièrement sous les tropiques, il s'agit là d'une condition presque permanente, tandis qu'aux pôles, c'est la luminosité qui est inadéquate pendant plusieurs mois de l'année. Le radar fournit des données fiables car le capteur produit sa propre illumination et utilise une longueur d'onde qui pénètre les nuages, la fumée et le brouillard, ce qui assure qu'une cible ne sera jamais dégradée par les conditions climatiques ou par de mauvaises conditions d'illumination.

Souvent, il faut utiliser plusieurs capteurs pour bien répondre à tous les besoins d'une application. La combinaison de plusieurs sources de données s'appelle la fusion ou l'intégration d'images. Les données additionnelles qui peuvent aider à l'analyse ou l'interprétation des images sont nommées données auxiliaires.

Les applications de la télédétection décrites dans ce chapitre sont représentatives, mais ne forment pas une liste exhaustive de toutes les applications possibles. Nous ne parlerons pas, par exemple, des domaines de la recherche et des applications pratiques en climatologie et en météorologie. Le lecteur notera aussi que plusieurs autres applications spécialisées (analyse de la praticabilité de terrain, investigations archéologiques, planification de routes ou autres passages, etc.) ne sont pas discutées dans ce texte.

Utilisations de plusieurs sources d'information

Chaque bande de données recueillie par un capteur contient des informations importantes et uniques. Nous savons qu'une cible interagit différemment selon la longueur d'onde de l'énergie incidente qui est reflétée, absorbée, diffusée ou retransmise dans des proportions différentes. L'apparence d'une cible peut facilement changer avec le temps, parfois en quelques secondes. Pour plusieurs applications, le fait d'utiliser l'information en provenance de différentes sources de données garantit une identification correcte de la cible et une cueillette de données aussi précises que possible.

Voici des façons de combiner plusieurs ensembles de données pour retirer le plus d'information possible d'une cible ou d'une région.

Données multispectrales

L'utilisation de plusieurs bandes spectrales vise à exploiter des "vues" différentes de la cible pour en faciliter l'identification. Plusieurs études ont été faites pour identifier les meilleures bandes spectrales pour l'identification et l'analyse de cibles spécifiques, comme des arbres

endommagés par des insectes.

Données multicapteurs

Différents capteurs fournissent des informations différentes et complémentaires qui lorsqu'elles sont intégrées, peuvent faciliter l'interprétation et la classification des images. Un exemple de cette fusion de données provenant de plusieurs capteurs serait la fusion d'images panchromatiques de haute résolution avec des images multispectrales à faible résolution. Nous pouvons aussi combiner des données acquises de façon active et passive. Un exemple spécifique serait l'intégration d'images RSO à des images multispectrales. L'imagerie RSO ajoute l'expression de la topographie ou du relief de surface à une image qui en paraît dépourvue. L'image multispectrale fournit l'information spectrale significative de la composition et de la couverture de la surface du sol. Ce type d'images est souvent utilisé en géologie où la lithologie (ou la composition minérale) est représentée par la composante spectrale, et où la structure est représentée par la composante radar.

Données multitemporelles

L'information multitemporelle est tirée d'une série d'images prises pendant une période de temps. Multitemporel peut signifier que les images ont été acquises à quelques jours, semaines, mois ou années d'intervalle. La surveillance du changement de la couverture du sol ou de la croissance urbaine nécessite des images acquises à différentes périodes. Des données calibrées, avec des contrôles attentifs sur l'aspect quantitatif de la réponse spectrale et de la rétrodiffusion, sont requises pour la bonne surveillance des activités. Avec des données non calibrées, une classification de l'image la plus ancienne est comparée à une classification de l'image plus récente, et les changements dans les frontières des classes sont tracés. Un autre outil multitemporel utile est l'observation de la phénologie (les changements de la végétation durant la saison de croissance), ce qui implique l'acquisition d'images à des intervalles fréquents durant la période de croissance.

L'information multitemporelle provient de l'interprétation d'images prises au-dessus de la même région, mais à différents moments. L'intervalle de temps entre les images est choisi de façon à surveiller un événement dynamique. Des événements catastrophiques (glissements de terrains, inondations, feux, etc.) nécessitent un intervalle de quelques jours, tandis que les événements plus lents (fonte de glacier, croissance d'une forêt) requièrent quelques années d'intervalle. Ce genre d'application exige aussi une uniformité dans la condition d'illumination (angle solaire ou géométrie d'images radars) pour produire des résultats de classification comparables.

Pour augmenter la précision de l'analyse multitemporelle critique et quantitative, il faut des données calibrées. C'est seulement en établissant une relation entre les niveaux de luminosité d'une image et des unités de mesure qu'on peut comparer des images de façon précise et quantifiable, et déterminer ainsi la nature et la grandeur des changements observés.

5.2 Agriculture



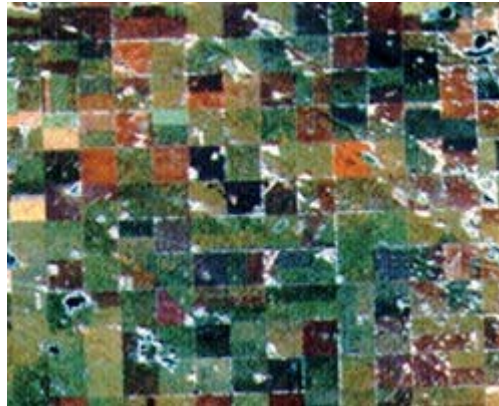
L'agriculture joue un rôle primordial dans l'économie des pays développés et en voie de développement. Elle peut représenter une industrie rentable pour un pays économiquement fort ou une production élémentaire de subsistance pour un pays pauvre. La production de nourriture est fondamentale pour tout le monde et la rentabilité économique est l'objectif de tous producteurs agricoles, de tous gestionnaires d'exploitation agricole à grande échelle et de toutes organisations agricoles régionales. Tout producteur agricole a besoin d'information pour gérer efficacement ses récoltes. Il doit disposer des outils d'information qui lui permettent de planifier ses opérations et de faire face aux multiples aléas pouvant menacer sa production, telles que des infestations d'insectes, intempéries, sécheresses ou dommages reliés au stress des végétaux, qui peuvent affecter le potentiel de sa récolte et les conditions de sa terre. Les courtiers de matières premières de sources agro-alimentaires sont aussi intéressés par les données sur la production agricole car c'est au moyen d'estimations de rendements de récolte (qualité et quantité) que sont fixés tous les prix pour le commerce international.



Les **images satellitaires et aériennes** servent à classification des cultures, à l'assurance de la santé et de la viabilité des productions et à la surveillance des mesures d'intervention. Parmi les applications de la télédétection à l'agriculture mentionnons :

- la classification des types de cultures
- l'évaluation de la santé des cultures
- l'estimation de la production totale d'une récolte
- la cartographie des caractéristiques du sol
- la cartographie des pratiques de gestion du sol
- la surveillance de conformité aux lois et traités.

5.2.1 Cartographie des types de cultures



Contexte général

L'identification et la cartographie des cultures sont importantes pour plusieurs raisons. Des cartes des différentes cultures sont créées par des agences agricoles nationales et multinationales, des compagnies d'assurance, et des commissions agricoles régionales pour dresser un inventaire des types des cultures pratiquées dans des régions données ainsi que des périodes de culture. Ces cartes permettent de prévoir les approvisionnements en grain (prédiction de production), de recueillir des statistiques sur la production, de maintenir des dossiers sur la rotation des cultures, de cartographier la production des sols, d'identifier les facteurs qui influencent la santé des plantes, d'évaluer les dommages causés par les tempêtes et la sécheresse et de surveiller les activités agricoles.

L'identification et le calcul de la surface des cultures (souvent mesurées en acres) est l'une des activités qui bénéficie le plus de cette cartographie agricole. Traditionnellement, c'est par le recensement et les levés au sol que l'on procédait pour obtenir ces informations. Cependant, l'utilisation de la télédétection favorise l'uniformisation des mesures, ce qui permet des stratégies communes de cueillette de données et d'extraction d'information, particulièrement pour les agences et les consortiums multinationaux.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection offre une méthode sûre et efficace de cueillette d'information dans le but de cartographier le type et de calculer la superficie des cultures. En plus d'offrir une vue synoptique, la télédétection peut fournir de l'information sur la structure et la santé de la végétation. La réflectance spectrale d'un champ varie selon le stade phénologique (stade de croissance), le type de plantes et leur état de santé. Les micro-ondes sont sensibles à l'alignement, la structure et la quantité d'eau présente dans les plantes et dans le sol, et peuvent fournir de l'information complémentaire aux données optiques. L'intégration de ces deux types de données augmente l'information disponible pour distinguer la signature spectrale de chaque classe et permet donc une classification plus juste.

Les résultats de l'interprétation des données de télédétection peuvent être intégrés dans un système d'information géographique (SIG) et dans un système de gestion des cultures, et

peuvent aussi être combinés à des données auxiliaires pour fournir de l'information sur les droits de propriété, les pratiques de gestion, etc.

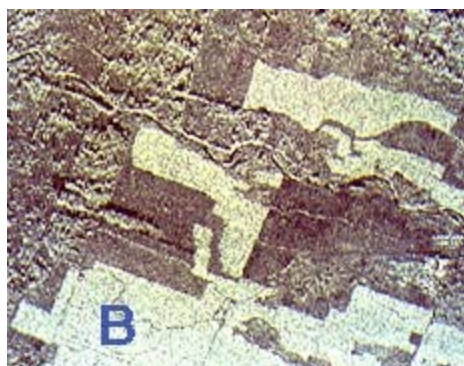
Exigences des données

L'identification et la cartographie des récoltes bénéficie de l'utilisation des images multitemporelles qui facilitent la classification en tenant compte des changements dans la réflectance des plantes durant leur croissance. Les données multitemporelles ont besoin de capteurs calibrés et d'images prises fréquemment durant la saison de croissance. Par exemple, les cultures de canola sont habituellement plus faciles à identifier lors de la floraison à cause du changement de la réflectance spectrale.

Les données multicapteurs sont aussi utiles, car elles augmentent la précision de la classification en fournissant plus d'information qu'un seul capteur ne peut le faire. Les images couleurs infrarouges montrent le contenu en chlorophylle des plantes et la structure du couvert végétal, tandis que les images radars fournissent de l'information sur la structure des plantes et sur le taux d'humidité. Dans les régions nuageuses et brumeuses, le radar est un excellent outil pour l'observation et la différenciation des cultures, car il est un capteur actif qui émet des rayonnements de longues longueurs d'onde plus grandes qui pénètrent facilement la vapeur d'eau atmosphérique.

Le Canada et les autres pays

Même si les principes d'identification des cultures sont identiques, l'échelle d'observation en Europe et dans le sud-est de l'Asie est beaucoup plus petite qu'en Amérique du Nord car les champs sont y plus petits. La couverture nuageuse en Europe et dans les pays tropicaux limite habituellement l'utilisation des capteurs optiques à haute résolution. Dans ces régions, les radars à haute résolution sont beaucoup plus utilisés.



Les grandes feuilles des cultures tropicales (cacao, banane, palmier) possèdent des signatures radars caractéristiques. Les feuilles de bananiers en particulier, sont caractérisées par une rétrodiffusion plutôt brillante (B dans l'image). Le suivi des stades de croissance du riz est une application importante dans les régions tropicales, particulièrement dans les pays asiatiques. Le radar est très sensible à la rugosité des surfaces et le développement des rizières provoque un changement important dans la tonalité des images : les surfaces lisses des rizières inondées au printemps produisent une faible résolution, tandis que les feuilles

des plantes matures produisent une rétrodiffusion élevée.



Étude de cas

Les pays de la Communauté Européenne (CE) utilisent la télédétection pour aider à remplir le mandat et les exigences de la politique agricole de la CE. Ces exigences sont la délimitation, l'identification et le calcul de la surface des cultures importantes en Europe pour produire des prévisions de récolte le plus rapidement possible durant la saison de croissance. Des procédures normalisées pour l'acquisition de ces données sont basées sur la technologie de la télédétection, et ont été développées par le projet MARS (Monitoring Agriculture by Remote Sensing). Les projets utilisent plusieurs types de données de télédétection : les données à faible résolution de NOAA-AVHRR jusqu'aux données radars à haute résolution, en plus de plusieurs sources de données auxiliaires.

The project uses many types of remotely sensed data, from low resolution NOAA-AVHRR, to high-resolution radar, and numerous sources of ancillary data. These data are used to classify crop type over a regional scale to conduct regional inventories, assess vegetation condition, estimate potential yield, and finally to predict similar statistics for other areas and compare results. Multisource data such as VIR and radar were introduced into the project for increasing classification accuracies. Radar provides very different information than the VIR sensors, particularly vegetation structure, which proves valuable when attempting to differentiate between crop type.

Ces données sont utilisées dans la classification des cultures à l'échelle régionale pour produire des inventaires régionaux, pour déterminer la santé et la condition de la végétation, pour donner un estimé de la production et finalement, pour produire des statistiques semblables pour d'autres régions dans le but de faire des comparaisons. Les données provenant de plusieurs sources, tels que les capteurs couleurs infrarouges et radars, ont été ajoutées au projet pour augmenter le niveau de précision des classifications. Le radar fournit des informations très différentes de celles recueillies par les capteurs optiques, particulièrement sur la structure de la végétation, ce qui est très utile pour la différenciation des types de cultures.

Une autre application importante en agriculture est l'utilisation opérationnelle des données

optiques et radars à haute résolution pour vérifier l'état des cultures d'un fermier qui réclame de l'aide ou une compensation. La télédétection permet également l'identification de zones de culture non conformes aux exigences ou présentant une apparence suspecte. Une fois repérées, ces cultures pourront, par la suite, être examinées de façon plus directe. Comme partie intégrante du IACS (Integrated Administration and Control System), les données de télédétection favorisent le développement et la gestion de bases de données qui contiennent de l'information sur les cadastres, sur l'utilisation du sol déclarée et sur la dimension des parcelles. Cette information servira dans l'évaluation des demandes de subvention.

Ces exemples démontrent quelques unes des nombreuses applications opérationnelles de la télédétection pour la surveillance et l'identification des cultures.

5.2.2 Surveillance des cultures et évaluation des dommages

Contexte général

L'évaluation de la santé des cultures, de même que la détection rapide d'infestations maximisent la qualité des productions agricoles. Le stress associé notamment au manque d'eau, aux insectes, aux infestations de champignons ou de mauvaises herbes, doit être détecté assez rapidement pour permettre au fermier de le corriger. Ce processus exige que les images soient acquises fréquemment (au minimum, une fois par semaine) et qu'elles soient livrées au fermier rapidement, habituellement dans les 2 jours.

De plus, une culture donnée ne croît pas partout au même rythme, ce qui entraîne d'importantes variations de production à l'intérieur d'un même champ. Ces différences de croissance peuvent être dues à des carences du sol en nutriments ou à d'autres formes de stress. La télédétection permet au fermier d'identifier les sections d'un champ les moins productives et de prendre des mesures correctives comme l'application d'engrais, d'herbicides ou de pesticides aux endroits précis qui en ont besoin. En plus d'améliorer la productivité de sa terre, cette approche permet au fermier de réduire ses dépenses ainsi que l'impact environnemental de ses interventions.

Certains gestionnaires qui sont très peu familiarisés avec les techniques agricoles sont appelés à gérer les échanges commerciaux et doivent fixer les prix d'achat et de vente des récoltes. Ils ont besoin d'information sur la santé des cultures mondiales pour fixer les prix et négocier des accords commerciaux. Ces gestionnaires se fient sur des données comme l'index d'évaluation des récoltes pour comparer les taux de croissance et la productivité d'une année à l'autre, et pour connaître la production de l'industrie agricole de chaque pays. Ce genre d'information peut aussi aider à cibler les sites de futurs problèmes, comme la famine en Éthiopie qui a été causée par la sécheresse à la fin des années 1980. L'identification de ces régions facilite la planification et la gestion de l'aide humanitaire et des efforts de secours.

Pourquoi la télédétection?



La télédétection possède plusieurs qualités qui se prêtent bien à la surveillance de la santé des cultures. Les capteurs optiques possèdent l'avantage de pouvoir détecter, non seulement le rayonnement visible, mais aussi le rayonnement infrarouge qui est très sensible à la santé, au stress et aux dommages subis par les cultures. Les images de télédétection donnent aussi une vue d'ensemble du terrain. De récents développements en communication et en technologie permettent à un fermier d'obtenir des images de ses champs et de prendre des décisions opportunes pour la gestion de ses cultures. La télédétection peut aider dans

l'identification des zones touchées par des conditions trop humides ou trop sèches, par des insectes, par des infestations de champignons et de mauvaises herbes ou par des

intempéries. Les images peuvent être acquises durant toute la saison de croissance, non seulement pour détecter des problèmes, mais aussi pour mesurer l'efficacité d'un traitement. Cette image montre les dommages et la destruction des récoltes causés par une tornade au sud-ouest de Winnipeg au Manitoba.



La végétation en santé contient une grande quantité de chlorophylle, la substance qui produit la couleur verte de la majorité des plantes. Les plantes en santé reflètent très peu le rayonnement rouge et bleu car la chlorophylle les absorbe, cependant elle réfléchissent beaucoup le vert et l'infrarouge. Des récoltes endommagées ou soumises à des stress ne contiennent pas autant de chlorophylle et subissent des changements de leur structure interne. La réduction en chlorophylle réduit la quantité de rayonnement vert réfléchi, tandis que les changements de la structure interne des plantes

réduisent la quantité de rayonnement proche infrarouge réfléchi. Ces réductions permettent donc une détection rapide du stress dans les cultures. L'analyse de la proportion d'infrarouge réfléchi par rapport au rouge donne une excellente mesure de la santé de la végétation. Ce rapport sert de principe de base pour certains indices de végétation tels que le NDVI (normalized differential vegetation index). Des plantes en santé possèdent une valeur NDVI élevée, car elles réfléchissent beaucoup de lumière infrarouge et ne réfléchissent presque pas de lumière rouge. Le stade phénologique et la santé des plantes sont les facteurs majeurs qui influencent la valeur NDVI. La différence qui apparaît entre les cultures irriguées et les cultures non irriguées nous fournit un excellent exemple de ce phénomène. Les cultures irriguées sont très vertes sur l'image couleur. Les sections plus foncées sont des pâturages secs contenant peu de végétation. Sur l'image infrarouge couleur, où la réflectance infrarouge est affichée en rouge, la végétation en santé est de couleur rouge vif, tandis que le pâturage demeure foncé.



Exigences des données

La détection des dommages et la surveillance de la santé des cultures exigent des données à haute résolution et multispectrales. Pour le producteur agricole, la livraison dans le plus court délai possible après l'acquisition de l'information constitue le facteur le plus important. Une image datant de deux semaines n'est d'aucune utilité pour la gestion et le contrôle des dommages en temps réel. Les images seront d'autant plus utiles qu'elles seront acquises à des moments spécifiques durant la croissance et à des intervalles fréquents.

Le Canada et les autres pays

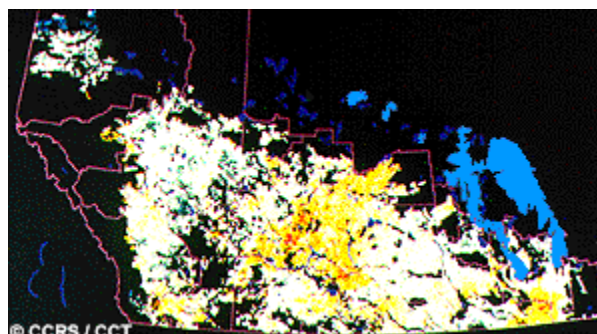
Des pratiques agricoles efficaces sont une priorité internationale, et plusieurs pays partagent les mêmes exigences que le Canada en matière de surveillance des cultures au moyen de la télédétection. Dans plusieurs cas, toutefois, l'échelle d'intérêt est plus petite : les champs moins grands en Europe et en Asie exigent l'utilisation de systèmes à plus haute résolution. Le Canada, les États-Unis et la Russie possèdent de grandes régions agricoles et ont développé, ou sont en train de développer, des systèmes d'information sur les cultures. Dans leurs cas, une couverture régionale et des données de plus faible résolution (1 km) peuvent être utilisées. La résolution plus faible facilite le traitement informatique car elle réduit l'espace nécessaire pour l'entreposage, le temps de traitement et les besoins en mémoire.

Comme exemple d'application internationale du suivi des cultures, citons celui des dattiers du Moyen-Orient. Les dattiers du Moyen-Orient constituent le sujet d'une étude qui tente de déterminer si la télédétection peut être utilisée pour détecter les dommages causés par le charançon rouge. Dans la péninsule arabique, la culture des dattes est extrêmement répandue, elle constitue l'une des plus importantes de la région. Une infestation par le charançon pourrait détruire rapidement les récoltes de dattes et anéantir une ressource de plusieurs centaines de millions de dollars. Une analyse spectrale de la végétation à partir de données de télédétection y est effectuée pour examiner la santé des dattiers. Les régions infestées apparaissent en jaune à l'œil nu et, sur les images de télédétection, elles réfléchissent moins d'infrarouge et plus de rayonnement rouge que les régions en santé. Les gestionnaires agricoles espèrent ainsi identifier les zones d'infestation pour pouvoir prendre les mesures nécessaires à l'élimination du charançon et à la protection des arbres en santé.

Étude de cas

Le système d'information des récoltes canadiennes : une carte des indices de récolte composés est créée à chaque semaine à partir de données NOAA-AVHRR. La carte, basée sur le NDVI, montre l'état de santé des cultures des prairies du Manitoba à l'Alberta. Ces cartes index sont produites de façon hebdomadaire, et peuvent être comparées aux indices des années précédentes pour vérifier la santé et le stade de croissance.

En 1988, les Prairies ont été frappées par une importante sécheresse. Des valeurs NDVI dérivées des données de NOAA-AVHRR ont été utilisées pour déterminer à quel point le manque d'eau a affecté les récoltes dans la région. Le rouge et le jaune indiquent des cultures en état de stress, tandis que le vert indique des cultures en bonne santé. Notez que les cultures en santé se situent dans des régions plus clémentes, comme le nord de l'Alberta (rivière Peace), ou dans des régions plus élevées comme à l'ouest de l'Alberta. Les régions non cultivées (pâturages et forêts) sont indiquées en noir.



5.3 Foresterie



L'importance des forêts comme ressource alimentaire et protectrice, comme habitat, comme pourvoyeur de papier, de matériaux de construction et de combustion ainsi que de plantes médicinales est indéniable. Les forêts jouent également un rôle important dans les réserves et l'équilibre des échanges de CO₂ sur la Terre. Elle constituent un maillon clé entre l'atmosphère, la géosphère et l'hydrosphère. Les forêts tropicales en particulier sont constituées d'une très grande **diversité** d'espèces d'arbres, capables d'une bien meilleure capacité d'adaptation et de survie que nos forêts à monoculture. Ces forêts diversifiées sont également l'habitat d'une multitude d'espèces animales, sans oublier les nombreuses espèces végétales dont on découvre de plus en plus la valeur au point de vue médicinal. Parmi les thèmes importants pour la gestion des forêts, mentionnons la surveillance du déboisement de sources naturelles (feux et infestations) ou humaine (coupes à blanc, brûlis, expansion de l'agriculture) et la surveillance de la santé et de la croissance pour la conservation et l'exploitation commerciale.

Jusqu'à maintenant les humains ont davantage considéré les produits forestiers que les forêts elles-mêmes. Ainsi, l'**extraction du bois** est une pratique courante presque partout au monde. Comme le déboisement a un effet à long terme sur le climat, la conservation du sol, la biodiversité et les régimes hydrologiques, on le retrouve au coeur même des préoccupations des activités de surveillance environnementale. L'exploitation commerciale des forêts est une industrie importante à travers le monde. Des



forêts sont coupées puis replantées et les compagnies d'exploitation forestière sont continuellement à la recherche de nouvelles sources de bois. Les pressions se faisant grandissantes pour la conservation des forêts primaires et vierges et les pratiques forestières abusives ayant grandement limité les régions de coupes potentielles, les compagnies d'exploitation forestière doivent modifier leurs méthodes et devenir plus efficaces et développer des méthodes d'exploitation plus écologiques. Leur propre survie de même que l'approvisionnement en bois d'une population toujours en croissance dépend de la préservation de la ressource.



L'exploitation commerciale de la forêt n'est pas la seule responsable du **déboisement**. Des facteurs humains (les brûlis pour l'agrandissement des pâturages et des champs de cultures, le développement urbain) et des

facteurs naturels (les sécheresses, l'agrandissement des déserts, la perte d'eau souterraine, les insectes, les feux, la maladie, le typhon) contribuent également à la disparition des forêts. Dans certaines parties du monde, particulièrement sous les tropiques, les forêts (tropicales humides) recouvrent ce qui peut être considéré comme la plus grande richesse qui soit : des terres fertiles. Les forêts sont brûlées ou rasées pour faciliter l'accès et l'utilisation de ces terres. Cette pratique survient souvent la perception des besoins de subsistance à long terme est éclipsée par celle des besoins de subsistance à court terme. Non seulement le déboisement des forêts riches en espèces diverses affecte-t-il le régime hydrologique local et régional, mais la fumée provenant des arbres en combustion pollue l'atmosphère, y ajoutant plus de CO₂ et augmentant l'effet de serre.

La surveillance de la santé des forêts est indispensable pour leur conservation et leur survie. Le déboisement d'espèces clés telles que les palétuviers sur les côtes où l'équilibre environnemental est fragile, la destruction de supports clés ou d'arbres abritant des essences potentiellement récoltables ou la disparition de larges biotes agissant comme réservoirs de CO₂ ont des répercussions négatives pour la société. De plus en plus d'efforts sont déployés pour assurer l'application des lois et des protocoles internationaux qui tentent de protéger ces régions.

La foresterie peut bénéficier de nombreuses applications internationales et domestiques de la télédétection. Mentionnons parmi celles-ci : le développement continu, la biodiversité, les titres et cadastres des terres, la surveillance du déboisement, la gestion du reboisement, les opérations de coupes commerciales, la cartographie et la protection des côtes et bassins versants et la surveillance biophysique (estimation d'habitats sauvages).

Certains pays en voie de développement ont une connaissance limitée de leurs ressources forestières. La cartographie du couvert forestier général, la surveillance des changements côtiers et des bassins versants, la surveillance des coupes et le suivi de la régénération, ainsi que la cartographie des feux de forêts et des zones brûlées sont autant d'applications que les agences ou compagnies canadiennes et étrangères qui sont en mesure d'utiliser la télédétection comme source d'information peuvent offrir sur le marché international.

Parmi les applications de la télédétection en foresterie se trouvent également :

1) La cartographie de reconnaissance

Les agences nationales forestières ou environnementales poursuivent des objectifs tels que la mise à jour du couvert forestier, la surveillance de la diminution des ressources et la mesure des propriétés biophysiques des forêts :

- discrimination du type de couvert forestier
- cartographie agroforestière.

2) La foresterie commerciale

Les compagnies forestières ainsi que les agences de gestion des ressources accordent beaucoup d'importance à l'inventaire et aux applications cartographiques telles que la collecte d'information sur les récoltes, la mise à jour des inventaires pour la demande de coupe, les types de forêts, la densité de végétation et les mesures de biomasse :

- cartographie de coupe à blanc / évaluation de la régénération
- déboisement par le feu
- cartographie d'infrastructure / support des opérations
- inventaire des forêts
- estimation de la biomasse
- inventaire des espèces.

3) Surveillance environnementale

Les gestionnaires de conservation sont préoccupées par la surveillance de la qualité, de la santé et de la diversité des forêts de la Terre :

- déforestation (forêts amazoniennes, colonies de palétuviers)
- inventaire des espèces
- protection des bassins déversants (bandes riveraines)
- protection des côtes (forêts palétiennes)
- santé et vigueur des forêts.

Les exigences canadiennes pour les applications forestières diffèrent considérablement des besoins internationaux, en raison des contrastes dans la taille des arbres, de la diversité des espèces (monoculture versus forêts riches) et des pratiques agroforestières. Le niveau de précision et de résolution requis pour les données diffère selon les besoins spécifiques. Les agences canadiennes ont beaucoup de connaissances fondées sur leurs ressources et leurs inventaires actuels, et leurs besoins en cartographie sont souvent comblés par des données facilement disponibles.

Le degré de précision nécessaire aux applications canadiennes exige l'utilisation d'information multispectrales, une résolution fine et des données continues. L'immense besoin de données fiables pour le couvert saisonnier oblige à rechercher un équilibre entre la résolution spatiale, la recherche de précision et le coût des données. Une résolution spatiale de 10 à 30 m semble adéquate pour la cartographie du couvert forestier, l'identification et la surveillance des coupes à blanc, la cartographie des zones en feu ou brûlées, la collecte de l'information des récoltes forestières et l'identification des dommages subis par les forêts. Une couverture spatiale de 100 à 10 000 km² est appropriée pour les couvertures forestières et pour la cartographie des coupes à blanc à l'échelle régionale et provinciale, tandis qu'une couverture spatiale de 1-100 km² est plus adéquate pour l'étude du couvert forestier et du volume de sites spécifiques.

Les gestionnaires de forêts tropicales sont, quant à eux, plus intéressés par des sources de données fiables, en fonction durant certaines périodes cruciales, et non assujetties aux conditions atmosphériques.

5.3.1 Cartographie des coupes à blanc / déforestation



Contexte général

La déforestation est un problème global dont les implications sont nombreuses. Dans l'Europe industrialisée, la pollution (pluies acides, suie et produits chimiques des cheminées industrielles) ont endommagé une grande partie des forêts. En ex-Tchécoslovaquie, la moitié des forêts ont été détruites ou endommagées par des polluants. Des effets similaires se font sentir en Allemagne, en Pologne et même dans les pays scandinaves. Dans les pays tropicaux, de précieuses forêts ont été détruites pour faire place à des terres cultivables et des pâturages. Il en résulte de grandes pertes à travers l'Amérique latine (Amérique centrale, le sud du Mexique, Haïti), l'Amérique du Sud (Brésil), l'Afrique et l'Asie. En Haïti et à Madagascar en particulier, les résultats en sont catastrophiques. La perte des forêts accentue l'érosion du sol et l'envasement des rivières, ce qui affecte la navigation, la pêche, les habitats sauvages, les réserves d'eau potable ainsi que la productivité et l'autosuffisance agricoles.

Des environnements estuariers sensibles sont protégés par les forêts de palétuviers qui sont coupées ou perdues pour le développement urbain et l'aquaculture ou endommagées par les polluants ou la boue. Le suivi de la santé de ces forêts est une étape vers la protection de côtes contre l'érosion, la dégradation et l'inondation des terres avoisinantes.

La perte des forêts affecte aussi la diversité génétique des espèces sur Terre qui contrôle notre habileté intrinsèque à nous adapter aux conditions changeantes et à l'environnement. Les forêts amazoniennes abritent environ la moitié des espèces de plantes et d'animaux sur Terre; leur destruction massive ne peut que réduire le potentiel génétique et la diversité des espèces.

Le taux et l'étendue de la déforestation, ainsi que le suivi de la régénération sont les paramètres clés mesurés par des méthodes de télédétection.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection regroupe une multitude d'outils pour mieux analyser l'étendue et l'échelle du problème de la déforestation. Les données multitemporelles permettent l'analyse de la détection des changements. Les images des années antérieures sont comparées aux scènes

récentes afin de mesurer concrètement les différences de l'étendue des coupes à blanc et des pertes de forêts. Les données de sources variées sont utilisées pour obtenir de l'information complémentaire. Le radar, combiné avec des données optiques, peut être utilisé pour surveiller efficacement l'état des coupes existantes ou l'émergence des nouvelles coupes, et peut même servir à examiner les conditions de régénération. Dans les pays où les coupes sont contrôlées et régies, la télédétection sert d'instrument de surveillance pour assurer que les compagnies respectent les limites et spécifications des coupes.

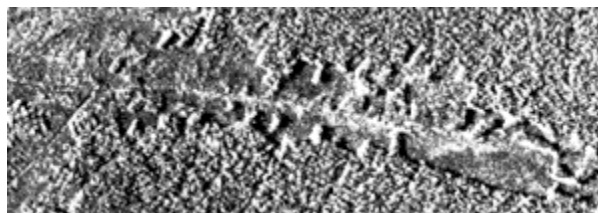
Les données à haute résolution offrent une vue détaillée du déboisement des forêts, tandis que le radar permet d'obtenir des images de régions autrement voilées par les nuages. Tous les instruments de télédétection procurent une vue de régions souvent éloignées et inaccessibles, où les coupes illégales et les dommages pourraient se poursuivre durant de longues périodes s'il n'y avait pas de surveillance aérienne.

Exigences des données

Des initiatives de surveillance à l'échelle du globe, comme l'étude du déboisement des forêts amazoniennes, dépendent de la couverture de grandes régions et de la continuité de l'acquisition des données; il est donc important d'utiliser un capteur à grande couverture temporelle. La cartographie et la surveillance de la coupe à blanc demandent aussi des images à l'échelle régionale et des données de résolution modérée ou grande, selon qu'on désire simplement détecter ou tracer une coupe. Comme pour plusieurs applications multitemporelles, une image avec une plus grande résolution peut être utilisée pour définir l'image de base, et des images à faible résolution peuvent être employées pour surveiller les changements de cette image.

Le Canada et les autres pays

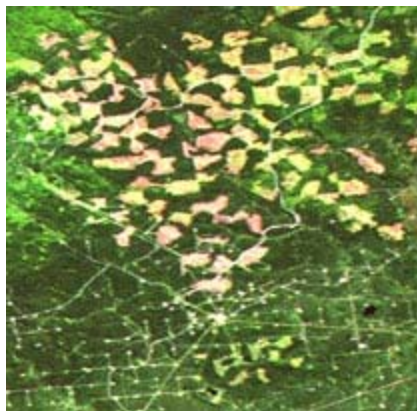
Les capteurs optiques sont encore les plus appropriés pour la cartographie et la surveillance des coupes à blanc au Canada parce que la végétation forestière, les coupes et la régénération ont des signatures spectrales distinctives, et que ces capteurs peuvent recueillir suffisamment de données sans nuages.



Comparaison d'une photographie (inférieure) et d'une image RSO (supérieure) de coupe forestière le long d'une route

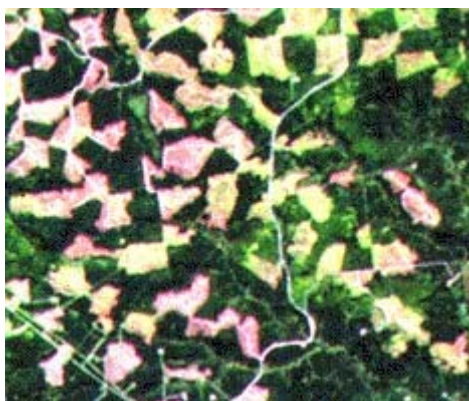
Le radar est plus utile pour les applications dans les régions tropicales humides parce que sa capacité à capter des images en tout temps permet de surveiller tous les types de déboisements, incluant les coupes à blanc, dans les zones sujettes aux conditions nuageuses. Les coupes peuvent être définies sur images radar parce qu'elles produisent moins de rétrodiffusion que le couvert forestier, et que la limite des arbres est rehaussée par les ombres et une rétrodiffusion brillante. Cependant, les coupes de régénération sont plus difficiles à détecter, puisque les régions de régénération avancée ne sont pas discernables des forêts matures. Les forêts de palétuviers se retrouvent habituellement dans des zones côtières tropicales souvent cachées sous un couvert nuageux, ce qui requiert un outil de surveillance fiable pour mesurer adéquatement le taux de déboisement. Les radars ont prouvé qu'ils pouvaient différencier les palétuviers des autres types de couverture, et certaines bandes avec de larges longueurs d'onde sont capables de pénétrer les nuages et la pluie. La seule limitation réside dans la différenciation des espèces de palétuviers.

Étude de cas



En Alberta, la plupart des forêts provinciales ont été vendues à des investisseurs étrangers intéressés à la production de pâtes et papiers. Dans la région de Whitecourt, la coupe à blanc des forêts de conifères a duré plusieurs décennies. Mais dernièrement, la demande croissante pour les produits du bois a accéléré la coupe des forêts, avec pour résultat le découpage du paysage en échiquier. En plus des coupes pour le bois d'oeuvre, le déboisement se produit aussi pour des coupes de lignes sismiques pour l'extraction et l'exploration du gaz naturel. Les deux types de capteurs, optiques et radars ont été

utilisés pour effectuer la surveillance des coupes à blanc et la régénération.



5.3.2 Identification des espèces

Contexte général

L'attribution du type de couvert forestier et l'identification des espèces sont des aspects importants pour les gestionnaires de conservation des forêts et pour les compagnies forestières intéressées à leur inventaire. L'attribution du type de couvert peut consister en une cartographie de reconnaissance au-dessus de grandes surfaces, tandis que l'inventaire des espèces sont des mesures hautement détaillées du contenu et des caractéristiques des forêts (type d'arbres, hauteur, densité).

Pourquoi la télédétection?

La télédétection nous donne des moyens d'identifier et de délimiter rapidement différents types de forêts, une tâche qui serait difficile et longue avec des moyens traditionnels de levés terrestres. Des données sont disponibles à différentes échelles et résolutions pour satisfaire les demandes locales ou régionales. L'identification des espèces à grande échelle peut être faite avec des données multispectrales, des données hyperspectrales ou par photographies aériennes, tandis que le détail des types de couverts à petites échelles peut être fait par interprétation de données radars ou multispectrales. L'imagerie et l'extraction de l'information peuvent être intégrées à un SIG pour une analyse plus poussée ou pour présentation avec des données auxiliaires telles que les pentes, les limites de propriété ou les routes.

L'imagerie hyperspectrale permet une haute résolution spatiale tout en faisant l'acquisition des données à résolution radiométrique très fine. Ce type d'information spectrale détaillée peut être utilisé pour générer des signatures d'espèces végétales et certains stress des arbres (ex. : les infestations d'insectes). Les données hyperspectrales offrent une vue unique des couverts forestiers, une vue impossible sans la technologie de télédétection.

Exigences des données

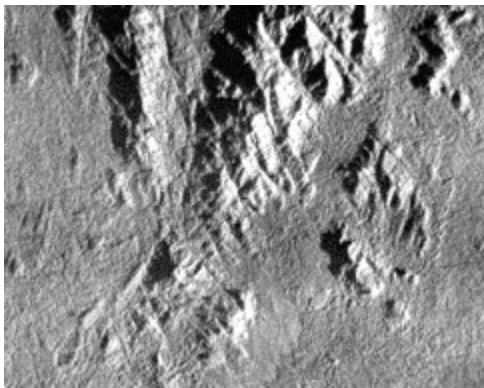
Les exigences dépendent de l'échelle choisie pour une étude. Pour la cartographie de reconnaissance régionale, une couverture de surface modérée, avec un capteur sensible aux différents couverts forestiers (texture de la canopée, densité du feuillage, réflexion spectrale) est nécessaire. Les banques de données multitemporelles contribuent aussi à l'information phénologique qui peut aider l'interprétation en intégrant les changements saisonniers de différentes espèces.

Pour l'identification détaillée des espèces, associée à l'analyse des groupements forestiers, une haute résolution ainsi que des données multispectrales sont requises. La visualisation des images en stéréo facilite la distinction et l'évaluation de la densité, l'évaluation de la hauteur et l'identification des espèces. En général, le suivi des propriétés physiques des forêts requiert de l'information multispectrale et des données finement calibrées.

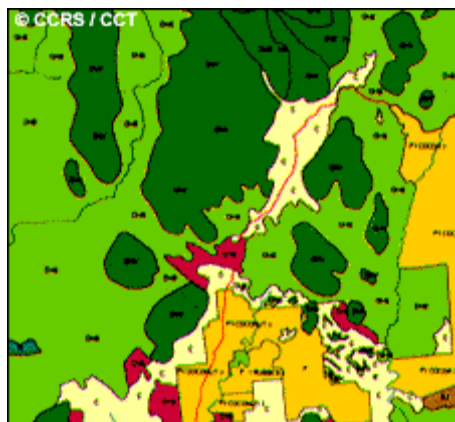
Le Canada et les autres pays

Les sources actuelles de données opérationnelles utilisées pour les applications d'attribution des types de couverts et d'identification des espèces au Canada sont la photographie

aérienne et l'orthophotographie, ainsi que les données satellitaires de Landsat TM et SPOT. Les données de LANDSAT sont les plus appropriées pour exécuter les sondages de reconnaissance au niveau des forêts, tandis que la photographie aérienne et l'orthophotographie numérique sont les sources de données préférées pour l'extraction d'information locale et de groupements d'arbres. Les photos aériennes sont plus appropriées pour les données opérationnelles au niveau des groupements, incluant la distinction des espèces. Les capteurs RSO tel RADARSAT sont utiles où les couches nuageuses persistantes limitent l'utilité des capteurs optiques.



Dans les régions tropicales humides, les évaluations et les mesures sont difficiles à obtenir, car les conditions nuageuses font obstacle aux moyens de télédétection conventionnels et les terrains difficiles empêchent la reconnaissance au sol. Dans ces conditions, la fiabilité de l'acquisition des données prend plus d'importance que la résolution ou la fréquence. Un capteur actif est peut-être la seule source possible de données et sa fiabilité facilitera la régularité de la surveillance. Le radar est tout indiqué pour ce rôle et un capteur aéroporté suffit pour les exigences de haute résolution telle que la distinction du couvert. Ce type de données peut être utilisé pour une carte initiale, et les données à faible résolution pourront servir aux mises à jour de cette carte.



Étude de cas (exemple)

Section des inventaires, ministère des Forêts, Colombie Britannique, Canada

Ceci est un exemple des exigences d'opérations et procédures pour un ministère provincial impliqué dans de nombreuses applications forestières utilisant la télédétection. La Section des inventaires a la responsabilité de maintenir une base de données informatives sur l'historique, le groupement et la gestion des forêts des terres de la Couronne concernant. Ces données sont utilisées pour déterminer le volume des coupes annuelles possibles. L'inventaire est lui-même fait tous les dix ans avec des photographies aériennes à l'échelle 1:15 000, et il est mis à jour avec des images satellitaires tous les deux ans.

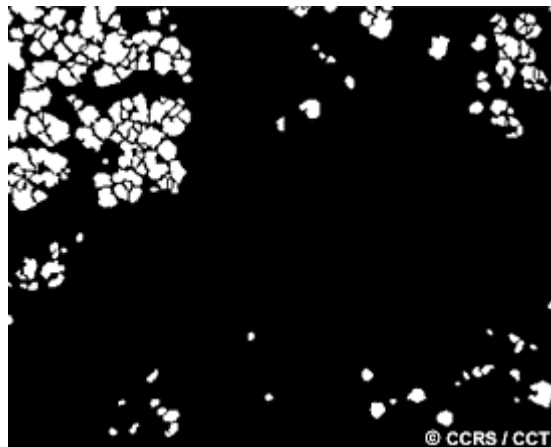
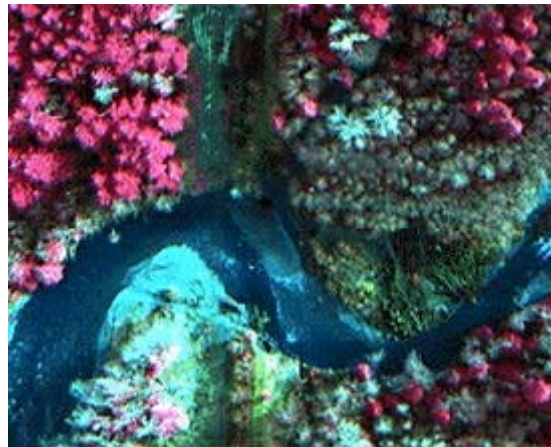
La Section des inventaires demande des données géocodées et avec correction de terrain. Pour la plupart des études, l'on obtient des données géocodées avec précision. Pour les projets de cartographie à grande échelle, l'on réduit les dépenses en se procurant des données géocodées systématiquement. Le traitement des données additionnelles requises est fait à l'interne, sur stations de travail. Quelques données de localisation sont fournies par le secteur privé, à l'aide de données GPS (système de positionnement global).

La précision planimétrique présentement demandée est de 20 m, mais les exigences seront resserrées dans un avenir rapproché. Les photographies aériennes et les ortho-images satisfont ces exigences et sont utiles pour l'interprétation, mais leur usage est limité compte tenu de leur coût. La fiabilité de l'obtention des données est importante puisque la surveillance est une opération continue. Pour un suivi intérimaire, les données TM sont acceptables quant au coût et au contenu en information pour la mise à jour des cartes.

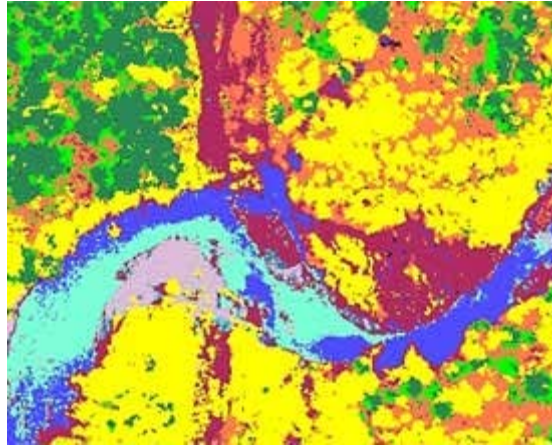
Present planimetric accuracy requirements are 20 m, but will be more demanding in the near future. Airphotos and orthophotos meet requirements and are good for interpretation but are limited by expense. Data continuity is important, as monitoring will be an ongoing operation. TM data for updating maps is reasonable in cost and information content for interim monitoring.

La plupart des mises à jour faites au Ministère des Forêts sont effectuées à l'aide des données TM, soit amenées numériquement dans une station de travail pour faire de la numérisation à l'écran, soit sous forme de transparents, avec l'image projetée sur une carte déjà existante. Le Ministère des Forêts est présentement en train d'étudier l'utilisation d'autres sources de données utilisant divers niveaux de traitement, et la possibilité d'intégration pour évaluer la précision en fonction des coûts.

Le Ministère des Forêts de la Colombie Britannique emploie le système expert SHERI (système hiérarchique de systèmes experts pour les inventaires de ressources) pour faire le lien entre les données de télédétection, les SIG et la modélisation de la croissance et de la productivité. Le circuit d'information est complété avec la création de produits finis incluant des cartes de couverts forestiers qui incorpore de l'information planimétrique et administrative sur la limites des terrains.

Étude de cas**Image hyperspectrale et recensement de tiges à partir d'images hyperspectrales**

Les compagnies forestières utilisent l'imagerie hyperspectrale pour évaluer le nombre de troncs par regroupement et pour la cartographie du type de surface de la région étudiée. Ces images montrent une image hyperspectrale fausses couleurs d'une forêt de sapins Douglas sur l'île de Vancouver avec une résolution de 60 cm. L'imagerie a été acquise à l'automne 1995 par le CASI (spectromètre imageur, aérien et compact).



- Les informations contenues dans l'imagerie sont, entre autres :
- la surface du groupement (hectares) : 9,0
- le nombre total d'arbres : 520
- la densité des arbres (tronc/ha) : 58
- la fermeture des cimes (%) : 12,46
- la surface moyenne des cimes (m2) : 21,47.

Les cartes de types de couverts contiennent les classes suivantes :

- **vert foncé** : conifères
- **vert** : branches basses
- **mauve pâle** : gravier
- **jaune** : feuillus
- **orange** : sol sec
- **rouge** : sol humide
- **bleu (pâle)** : eau
- **bleu (foncé)** : eau claire ou profonde

Toutes les images sont gracieusement offertes par MacMillan Bloedel et ITRES Research Limited.

5.3.3 Cartographie des zones brûlées

Contexte général

Le feu fait partie du cycle de reproduction naturelle de plusieurs forêts : il revitalise la croissance en ouvrant les graines et en libérant les nutriments du sol. Mais les feux peuvent aussi se propager rapidement et menacer les habitations et la vie sauvage, décimer les réserves en bois, et endommager temporairement des aires de conservation. Les gestionnaires des forêts ont besoin d'information pour tenter de contrôler les feux et pour évaluer le rétablissement de la forêt après un feu.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection peut être utilisée pour la détection et la surveillance des feux de forêts et la repousse après un feu. Comme outil de surveillance, le survol de routine facilite l'observation des régions éloignées et inaccessibles en alertant les agences de surveillance de la présence et de l'importance d'un feu. Les données thermiques du capteur AVHRR de la NOAA et les données météorologiques de GOES peuvent être utilisées pour localiser les feux actifs et les points chauds qui s'ensuivent lorsque les capteurs optiques sont gênés par la fumée, la brume et la noirceur. La comparaison entre les régions brûlées et les feux actifs fournit l'information sur la vitesse et la direction du feu. Les données de télédétection peuvent aussi faciliter la planification des routes pour l'accès ou l'évacuation d'une zone menacée par le feu, la planification du support logistique pour combattre le feu et pour identifier les zones qui ont peine à récupérer après un feu.

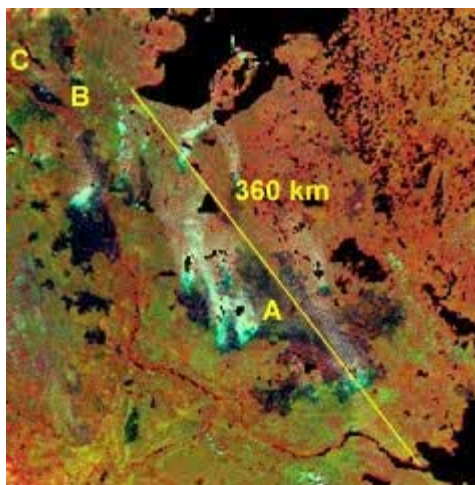
Quelques années après un feu, une mise à jour de la santé et de la régénération d'une région peut être faite au moyen d'une seule image. Des scènes multitemporelles peuvent illustrer la progression de la végétation, du début de la repousse jusqu'au stade de forêt mature.

Exigences des données

Alors que les données thermiques sont idéales pour la détection et la cartographie des feux actifs, les données multispectrales (optique et proche-infrarouge) sont préférées pour l'observation des stades de croissance et la phénologie dans les zones déjà brûlées. L'âge relatif et la surface des zones brûlées peuvent être définis et délimités et la santé de la végétation en recroissance peut être suivie et évaluée. Une couverture spatiale modérée, une résolution spatiale élevée à moyenne et une fréquence d'imagerie élevée sont nécessaires pour la cartographie des zones brûlées. Alors que la détection et la surveillance des feux requièrent une grande couverture spatiale, une résolution moyenne et une fréquence de prises de données élevée sont nécessaires pour assurer un délai de réponse court.

Le Canada et les autres pays

Les exigences pour la cartographie des zones brûlées sont les mêmes, à l'exception des régions où les nuages empêchent l'utilisation des capteurs optiques. Dans ce cas, le radar peut être utilisé pour la surveillance des zones brûlées et il est efficace à partir de la deuxième année après un feu.

Étude de cas : des zones brûlées des Territoires du Nord-Ouest

Feux de forêts près de Norman Wells. T.N.-O.

Dans la partie ouest des Territoires du Nord-Ouest, le long du fleuve Mackenzie, les forêts boréales couvrent une grande partie du territoire. Les autochtones dépendent de la forêt pour la chasse. Le sol sensible et le pergélisol du nord sont protégés de l'érosion par la couverture forestière. Au début des années 1990, un immense feu a dévasté la région juste à l'est du fleuve Mackenzie et a menacé la ville de Fort Norman, une ville autochtone au sud de Norman Wells.

Les régions brûlées et les régions encore en feu sont les zones sombres (A) sur cette image NOAA. Le lac dans le coin supérieur droit est le Grand Lac de l'Ours, et celui dans le coin inférieur droit est le Grand Lac des Esclaves. La distance représentée par la ligne jaune est d'environ 580 km. Le fleuve Mackenzie peut être vu à gauche de ces deux lacs. Fort Norman (B) est localisé à l'intersection du fleuve Mackenzie et de la rivière du Grand Ours. À ce point, le feu ravageait les deux rives du fleuve. Norman Wells (C) est une région productrice de pétrole; des silos d'entreposage, des plates-formes de forage, des habitations et le seul aéroport commercial dans cette partie du pays étaient en péril. Les feux de cette région sont difficiles d'accès en raison du manque de route. Les routes d'hiver donnent un accès saisonnier aux véhicules dans cette partie du Canada. La population très limitée de cette région est incapable de faire face à un feu de cette ampleur.

La brume et la fumée réfléchissent une quantité importante d'énergie dans les courtes longueurs d'onde et apparaissent bleues sur cette image.

5.4 Géologie



La géologie est l'étude des formes de terrain, des structures et de l'écorce terrestre, et a pour but de comprendre les processus physiques qui modifient la croûte terrestre. Elle est généralement perçue comme étant l'exploration et l'exploitation des ressources minérales et pétrolières dans le but d'améliorer les conditions de vie de la société. Le pétrole produit de l'essence et de l'huile pour les véhicules; les agrégats et le calcaire sont des matériaux de base pour la construction des routes et des bâtiments; les mines de potasse contribuent à la fabrication d'engrais; le charbon contribue à la production d'énergie; les métaux précieux sont utilisés pour les bijoux, les diamants pour les outils de forage; et le cuivre, le zinc et autres minéraux ont plusieurs utilisités. La géologie comprend aussi l'étude des phénomènes naturels potentiellement dangereux comme les volcans, les glissements de terrain et les tremblements de terre, et constitue donc un apport important pour les études géotechniques de construction et de génie. La géologie n'est pas limitée à la surface de la Terre - la télédétection a été utilisée pour examiner la composition et la structure des autres planètes et satellites naturels.

La télédétection est un outil qui permet l'extraction d'information sur la structure ou la composition de la surface de la Terre. Elle est souvent combinée à d'autres sources de données pour des mesures complémentaires. À partir de la réflectance spectrale, les données multispectrales peuvent fournir de l'information sur la composition lithologique des roches. Le radar fournit de l'information sur la rugosité et la géométrie de la surface et est donc très utile, surtout quand il est combiné avec des données provenant d'autres sources pour produire une représentation détaillée du relief.

La télédétection n'est pas limitée aux applications géologiques directes; elle est aussi utilisée dans la planification et la logistique, comme la planification de routes d'accès dans une région minière, la surveillance de projet de réclamation, et dans la création de cartes de base sur lesquelles les données géologiques peuvent être superposées.

Voici une liste des principales applications de la télédétection pour la géologie :

- la cartographie des dépôts de surface
- la cartographie lithologique
- la cartographie structurale
- l'exploration et exploitation des agrégats (sable et gravier)
- l'exploration minière
- l'exploration pétrolière
- la géologie environnementale
- la géobotanique
- l'infrastructure de base
- la cartographie et surveillance des taux de sédimentation
- la cartographie et surveillance des phénomènes naturels
- la cartographie des risques géologiques
- la cartographie planétaire.

5.4.1 Cartographie structurale et analyse des formes de terrain



Image RSO de structures synclinales (Pennsylvanie)

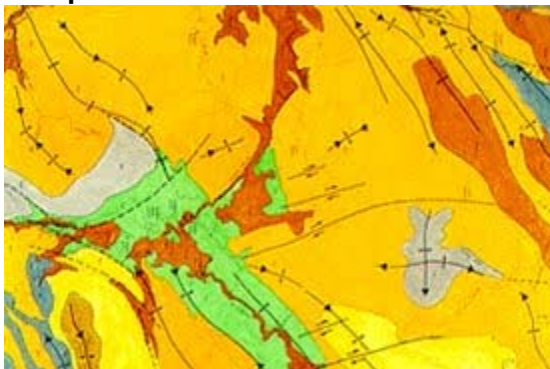
Contexte général

La géologie structurale joue un rôle important dans l'exploration pétrolière et dans l'identification et la surveillance des risques naturels.

La cartographie structurale est l'identification et la caractérisation de l'expression structurale de la surface. Ces structures comprennent les plis, les failles et les linéaments. La compréhension des structures est la clé de l'interprétation des mouvements de la croûte qui ont formé le terrain actuel. Les structures indiquent les sites potentiels de réserves de pétrole et de gaz, car elles caractérisent la géométrie des unités de roche du substratum et le niveau de déformation et de stress survenu dans une région. L'on peut obtenir un profil détaillé de la structure par des techniques géophysiques telles que les relevés sismiques.

Les structures géologiques sont aussi examinées pour des indices de mouvements de la croûte et de dangers potentiels tels que les tremblements de terre, les glissements de terrain et l'activité volcanique. L'identification des lignes de failles facilite la planification de l'utilisation du sol en restreignant la construction sur des zones de risques d'activité sismique.

Pourquoi la télédétection?



Une vue synoptique d'une région offre une perspective très différente de celle que l'on peut avoir à partir d'observations au sol dans la cartographie des **structures géologiques**. La télédétection fournit cette perspective régionale.

Certains capteurs de télédétection, comme le radar, fournissent une information unique sur les structures telles que l'expression du relief. La comparaison de l'expression du relief avec d'autres informations géologiques peut permettre l'identification de patrons d'association. Par

exemple, une unité de roche peut être caractérisée par une texture radar particulière qui correspond à une intensité magnétique élevée ou à une anomalie géochimique. La télédétection s'avère plus utile en combinaison ou en synergie avec des données complémentaires.

Le radar à visée latérale permet de contrôler les conditions d'illumination. De plus la géométrie d'acquisition peut être adaptée selon le genre de surface examinée. Les conditions d'illumination uniforme produites par le soleil, surtout dans les régions équatoriales, ne facilitent pas la distinction du relief. Un autre avantage des capteurs RSO aéroportés est que la direction de vol des missions d'acquisition peut être orientée parallèlement à l'orientation de la cible pour maximiser les effets d'illumination et d'ombrage.

Exigences des données

Dans les régions où le couvert végétal est dense, il est très difficile de percevoir les caractéristiques structurales. Un couvert dense va cacher visuellement les formations sous-jacentes, ce qui limite l'utilisation de capteurs optiques pour cette application. Le radar, par contre, est sensible aux variations topographiques et est capable de distinguer l'expression de la structure géologique qui se répercute dans le couvert forestier. Les structures géologiques peuvent donc être identifiées clairement sur les images radars.

Les analyses structurales sont effectuées à des échelles régionales pour fournir un aperçu général de l'ampleur des failles, des linéaments et des autres éléments structuraux. Les éléments géologiques sont généralement assez grands (échelle en kilomètres), les applications nécessitent donc des images à petites échelles pour couvrir l'étendue de l'élément étudié. Les photos aériennes peuvent être utilisées dans les régions tempérées où des images à grandes échelles sont nécessaires, particulièrement pour la cartographie des dangers naturels potentiels.



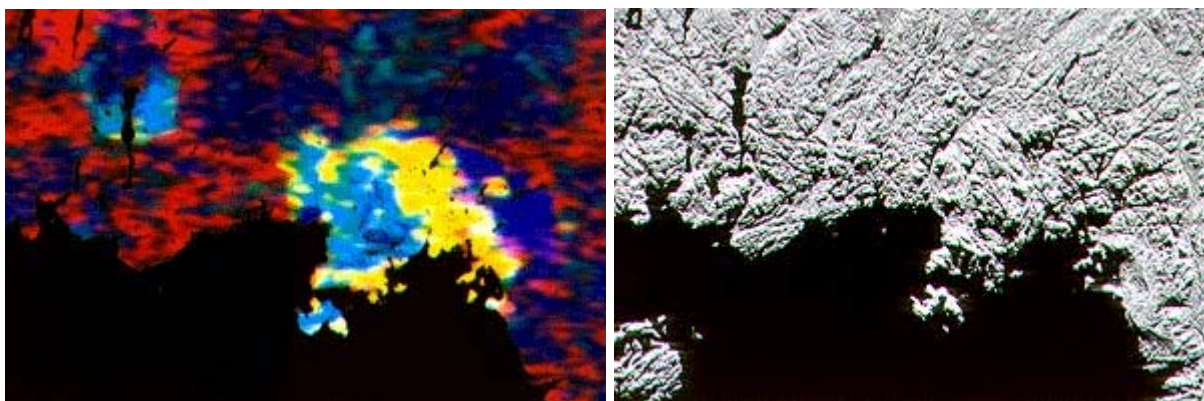
Généralement, le temps ne joue pas de rôle important dans les applications de la cartographie structurale (sauf pour les dates d'échéance d'un projet) ces applications ne nécessitent donc pas un traitement et une livraison rapides. De même, la fréquence des images n'est pas un facteur critique, sauf pour une analyse des déformations de la croûte sur une certaine période de temps. Pour les données de télédétection, le facteur clé est

qu'elles peuvent fournir de l'information sur la distribution spatiale et sur le relief de surface des éléments structuraux. Le radar à vue latérale convient bien à cette application. Le fait de capter des images avec des angles d'incidence faibles met en valeur le relief et la structure superficielle. Les **ombres** aident à définir la hauteur et la forme de la structure et facilitent l'analyse structurale.

Le Canada et les autres pays

Les exigences pour les données de télédétection sur l'analyse structurale sont assez constantes à travers le monde. Les régions nuageuses bénéficient des images radars, tandis que les régions de hautes latitudes peuvent bénéficier des angles d'incidents faibles du soleil pour rehausser le relief sur des images optiques.

Étude de cas: Port Coldwell, Ontario : intégration des images RSO



L'information structurale fournie par le radar complète les autres données spatiales. Quand elles sont combinées, les deux sources de données produisent une source précieuse d'information géologique. Dans cet exemple, l'information sur la radioactivité de la région de Port Coldwell, Ontario provient d'un **levé de spectrogrammétrie aéroporté** qui a recueilli des valeurs pour le potassium, le thorium et l'uranium. L'information naturelle de radioactivité est informative, mais il est difficile de se situer sans avoir les caractéristiques identifiables du terrain. Cette image RSO a aussi été acquise au-dessus de cette région. L'image RSO est très intéressante, mais à part la micro-topographie et la structure, elle ne fournit pas d'autre information géologique. Ces deux séries de données ont été combinées utilisant la technique ITS (Intensité-Teinte-Saturation). Les données aéroportées de spectrométrie de rayons gamma sont codées comme information de teinte et de saturation, tandis que les données RSO sont codées comme information d'intensité. L'**image intégrée résultante** est un excellent exemple d'intégration de l'information structurale, topographique et de la radioactivité. L'image permet aux géologues d'avoir une vue d'ensemble de ces données.

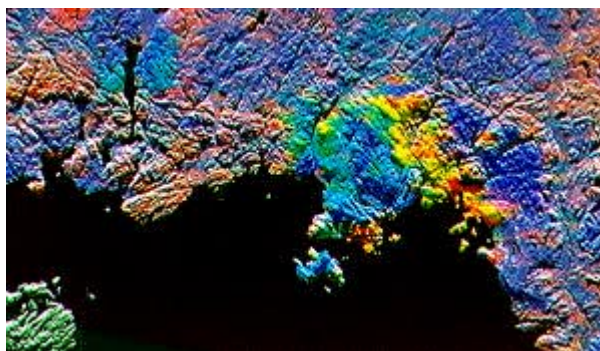


Image intégrée (radioactivité naturelle et RSO) de Port Coldwell

5.4.2 Cartographie des unités géologiques

Contexte général

La cartographie des unités géologiques consiste en l'identification des unités physiographiques et en la détermination de la lithologie de la roche en place ou de la stratigraphie générale des unités exposées. Ces unités ou formations sont généralement décrites par leur âge, leur lithologie et leur épaisseur. La télédétection permet de décrire la lithologie en utilisant la couleur et les caractéristiques d'altération et d'érosion, les réseaux de drainage et l'épaisseur des bancs rocheux.

La cartographie est utile dans l'exploration pétrolière et minière, car ces deux ressources sont souvent associées à des lithologies spécifiques. Les structures souterraines, qui peuvent être favorables à l'emprisonnement du pétrole ou à la présence de minéraux spécifiques, se manifestent souvent à la surface de la Terre. En délimitant ces structures et en identifiant les lithologies associées, les géologues peuvent reconnaître les régions qui présentent ces caractéristiques et les cibler pour l'exploration. La cartographie de la roche-mère est importante pour l'ingénierie, la construction et les opérations minières, et peut aussi jouer un rôle dans la planification urbaine. Comprendre la distribution et les relations spatiales des unités facilite l'interprétation de l'histoire géologique.

En télédétection, les unités lithostratigraphiques peuvent être délimitées par leurs signatures spectrales, par la structure de leurs strates et par la morphologie de la surface.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection offre la vue générale requise pour dresser des cartes d'unités régionales utiles aux analyses à petite échelle et à la planification des vérifications des unités de terrain en vue d'une cartographie détaillée. La télédétection permet aussi de comprendre la distribution spatiale et les relations de surface entre les unités. La télédétection VIR fournit de l'information multispectrale liée à la composition de l'unité, tandis que le radar donne de l'information texturale. Les données de sources multiples peuvent être intégrées pour produire un aperçu de la lithostratigraphie.

Les images stéréos peuvent aussi faciliter l'identification et la délimitation des unités, car elles fournissent un aperçu en trois dimensions du relief local. Il y a des roches qui sont résistantes à l'érosion, et d'autres qui s'usent facilement. L'identification d'éléments tels que les signes d'altération peut être faite à partir d'images à haute ou moyenne résolution ou de photos aériennes.

Les images ou les photos peuvent être utilisées pour le travail de terrain et comme cartes de base.

Exigences des données

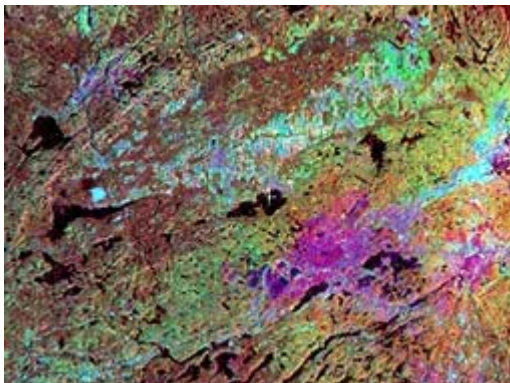
Les deux différentes échelles de cartographie requièrent des sources et des paramètres d'images différents.

1. Pour l'analyse d'un site spécifique, les photos aériennes constituent un produit à haute résolution qui peut fournir de l'information sur l'érosion, la teinte et le microdrainage. Les photos peuvent être facilement utilisées en stéréo pour évaluer les caractéristiques du relief.
2. Les aperçus régionaux requièrent des images de résolution moyenne couvrant une grande superficie. La combinaison des images optiques et radars pour mettre en valeur le terrain et la texture produit une excellente source de données régionales.

Dans les deux cas, la fréquence des images et leur livraison n'est pas importante car, en général, les unités géologiques changent très lentement.

Le Canada et les autres pays

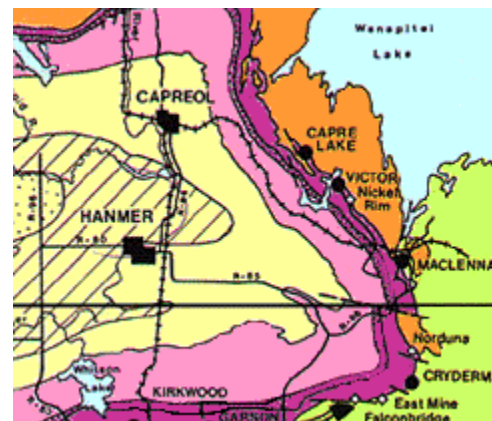
Les exigences pour cette application sont à peu près les mêmes d'un pays à l'autre. Un des problèmes qui affecte l'acquisition de l'information géologique dans les pays tropicaux et tempérés est le couvert forestier. Dans ces régions, les géologues peuvent utiliser la télédétection pour déduire la lithologie sous-jacente en regardant la composition et l'état de la végétation qui y pousse. Cette technique est appelée la géobotanique. Les composantes minérales et sédimentaires de la roche-mère peuvent influencer et contrôler la nature et l'état de la végétation.

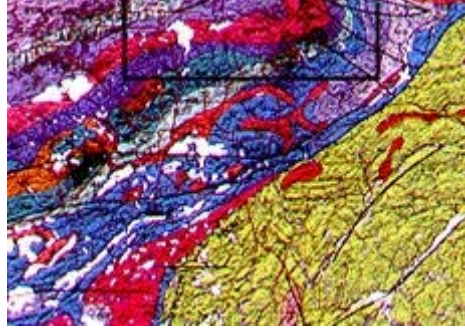


En réalité, la combinaison de la topographie, de la structure, des matériaux de surface et de la végétation facilite l'interprétation et la cartographie des unités géologiques. Une utilisation **optimale des données de télédétection** combine les différentes sources de données telles que les images optiques ou radars, à une échelle appropriée pour l'étude.

Exemples d'images

Même après que des cartes des unités géologiques d'une région soient produites, elles peuvent être présentées de façon plus informative en intégrant l'information texturale des images radars. Une unité géologique de base est plus informative après l'ajout de l'information structurale et texturale. Dans cet exemple de la région de Sudbury en Ontario, une intégration ITS a été utilisée pour combiner les données cartographiques (roche-mère et géologie structurale, 1992) avec une image radar. L'image résultante peut être utilisée à l'échelle locale et régionale pour déceler des tendances structurales à l'intérieur et entre les unités. Les régions communes des images sont représentées en noir.





Intégration des données cartographiques avec une image radar.

5.5 Hydrologie



L'hydrologie est l'étude de l'eau sur la Terre, qu'elle coule à la surface, qu'elle soit gelée sous forme de glace ou de neige, ou qu'elle soit emprisonnée dans le sol. L'hydrologie est naturellement liée à plusieurs autres applications de la télédétection, particulièrement à la foresterie, à l'agriculture et à l'utilisation du sol, parce que l'eau est une composante importante dans chacun de ces domaines. Comme la plupart des processus hydrologiques sont dynamiques, de façon saisonnière et quotidienne, une observation fréquente est nécessaire. La télédétection offre un aperçu synoptique de la distribution spatiale et de la dynamique des processus hydrologiques, qui n'est généralement pas disponible avec les relevés terrestres. Le radar apporte une nouvelle dimension aux études hydrologiques, car c'est un capteur actif qui permet l'acquisition de données le jour, la nuit et même durant les tempêtes.

Voici quelques applications hydrologiques :

- la cartographie et la surveillance des marécages
- l'évaluation de l'humidité du sol
- la surveillance et la cartographie de l'étendue d'une surface de neige
- la mesure de l'épaisseur de la neige
- l'évaluation de la quantité d'eau d'une surface de neige
- la surveillance de la glace fluviale et lacustre
- la surveillance et la cartographie des inondations
- la surveillance de la dynamique des glaciers (ablation, poussée)
- la détection des changements dans les rivières et les deltas
- la cartographie et la modélisation des bassins hydrologiques
- la détection des fuites des canaux d'irrigation
- la planification des horaires d'irrigation.

5.5.1 Cartographie et la délimitation des inondations

Contexte général

Les inondations constituent un phénomène naturel du cycle hydrologique. Elles s'avèrent nécessaires pour renouveler la fertilité du sol, car elles déposent périodiquement de nouveaux nutriments et des sédiments fins. Mais elles peuvent aussi causer la perte de vies, la destruction temporaire d'habitats sauvages et des dommages permanents aux infrastructures urbaines et rurales. Des inondations fluviales peuvent être causées par l'endommagement des barrages humains ou naturels, la fonte catastrophique de la neige ou la glace, la pluie, l'engorgement des rivières par la glace et le ruissellement excessif de l'eau de fonte au printemps.



Pourquoi la télédétection?

Les techniques de télédétection sont utilisées pour mesurer et effectuer le suivi de la superficie de l'inondation, pour orienter les secours de façon efficace et pour fournir des évaluations quantifiables sur l'étendue des terres et des infrastructures touchées. L'incorporation des données de télédétection dans un SIG permet le calcul et l'évaluation rapides des niveaux d'eau, des dommages et des régions en danger d'inondation. Les agences de prévision d'inondations, les compagnies hydroélectriques, les organismes de conservation, les urbanistes, les organismes de secours d'urgence et les compagnies d'assurance utilisent tous ce type de données. L'identification et la cartographie des plaines alluviales, des chenaux de rivières abandonnés et des méandres sont importantes pour la planification des réseaux de transports.

Exigences des données

Plusieurs utilisateurs des données de télédétection ont besoin d'information durant une crise; ils ont donc besoin de données en temps réel. Le délai de traitement et de livraison est moins important pour les utilisateurs qui travaillent dans la modélisation hydrologique, dans les études d'étalonnage et de validation, dans l'évaluation des dommages, et dans la planification de moyens d'atténuation des inondations. Les inondations sont habituellement de courte durée et surviennent généralement durant des périodes de mauvais temps; les capteurs optiques qui normalement produisent l'information utile pour cette application, deviennent alors inutiles, car ils ne peuvent pénétrer la couche nuageuse. Pour cette raison, des capteurs actifs RSO sont particulièrement importants pour la surveillance des inondations.

RADARSAT, en particulier, offre un intervalle très court entre le moment d'acquisition des données et la livraison au client. Les données RSO permettent de bien discerner les surfaces de terre des surfaces d'eau, ce qui permet la cartographie rapide des limites de l'étendue des inondations. Les données RSO sont encore plus utiles quand elles sont intégrées à une

image acquise avant l'inondation puis présentées dans un SIG contenant l'information cadastrale et les réseaux routiers.

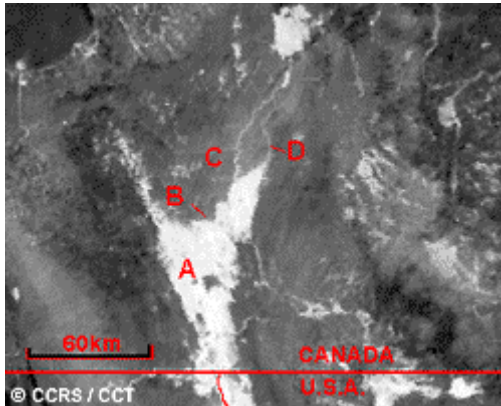
Le Canada et les autres pays

Les exigences pour cette application sont semblables pour tous les pays. Les inondations peuvent survenir partout dans le monde, sur les côtes ou à l'intérieur des terres, et les conditions pour l'acquisition d'images sont semblables. Le radar facilite la différenciation entre l'eau et la terre, et est une source fiable d'images.

Étude de cas

En 1997, l'inondation canadienne la plus importante du vingtième siècle envahissait les terres et les villes des États du Minnesota, du Dakota du Nord et de la province du Manitoba. En date du 5 mai, 25 000 résidents avait été évacués, et 10 000 autres étaient en état d'alerte. Le bassin de la rivière Rouge, partant des États-Unis et s'écoulant vers le nord au Canada, a reçu une quantité exceptionnelle de neige au courant de l'hiver et aussi, beaucoup de pluie au mois d'avril. Ces deux facteurs, combinés à la direction d'écoulement qui entraîne l'eau vers des régions plus froides et le terrain très plat au-delà de la plaine alluviale, ont causé une inondation record qui infligea des dommages importants aux habitations et aux propriétés, et causa la perte de faune et de bétail. Pendant plusieurs semaines, les équipes des secours, les résidents de la région et les médias ont surveillé l'étendue de l'inondation, assistés par des techniques de la télédétection. Il était impossible d'imaginer l'envergure de l'inondation à partir du sol, et même les vidéos et les photographies aériennes n'étaient pas en mesure d'en montrer l'étendue totale. Mais les images satellitaires ont illustré la progression de l'inondation qui prenait d'abord la forme d'un ruban de 200 mètres de largeur et se terminait par une mer large de 40 km. Les villes protégées par les digues de sacs de sables paraissaient comme des îles dans la nouvelle "Mer Rouge". Plusieurs autres localités ne s'en sont pas aussi bien tirées, et de nombreux propriétaires de maisons et de commerces y ont tout perdu.

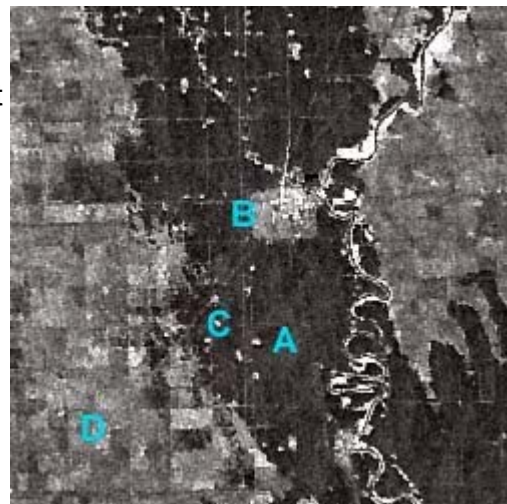
Les propriétaires des maisons, des commerces et des fermes endommagés ou détruites par l'eau ont réclamé des indemnités à leurs compagnies d'assurance. Les compagnies d'assurance ont eu recours aux données de télédétection délimitant l'étendue des inondations et aux bases de données des SIG pour identifier rapidement qui avait été directement touché et pouvait avoir droit aux compensations financières. Les gestionnaires des villes touchées ou menacées ont aussi utilisé les images pour étudier les sites où le renforcement ou la construction de nouvelles digues était nécessaire, ainsi que pour la planification résidentielle.



Les images des satellites RADARSAT et NOAA-AVHRR ont bien illustré l'échelle et l'envergure de l'inondation. Le capteur AVHRR à bord du satellite NOAA a fourni un aperçu à petite échelle de toute la région inondée, des lacs Manitoba et Winnipeg jusqu'aux frontières du Dakota du Nord et du Sud. Quelques-unes des meilleures images ont été acquises durant la nuit, dans les longueurs d'ondes de l'infrarouge thermique. La terre sèche et froide paraît en tons plus foncés, tandis que l'eau (A), un peu plus chaude, paraît en blanc. Des digues

artificielles, telle la digue de Brunkild (B), ont été construites rapidement pour prévenir l'écoulement de l'eau dans la partie sud de la ville de Winnipeg. Cette dernière (C) n'est pas facilement discernable sur l'image, mais on peut voir le canal de déviation (D), à l'est de la ville car il est rempli d'eau. Ce canal a été conçu pour détourner l'excès d'eau de la rivière Rouge à l'extérieur des limites de la ville, mais le canal n'a pu contenir tout le volume d'eau, il y a eu refoulement et l'eau s'est répandue sur les plaines.

La capacité de **RADARSAT** d'acquérir des images durant la nuit et les journées nuageuses et sa sensibilité aux différences entre la terre et l'eau lui ont permis de produire d'excellentes images de l'inondation. Sur cette image, l'eau (A) entoure complètement le village de Morris (B) que nous voyons comme un point brillant entouré d'eau foncée. Les régions inondées paraissent très foncées sur l'image, car l'eau ne retourne pas beaucoup de rayonnement incident vers le capteur. La ville possède cependant plusieurs réflecteurs angulaires (les bâtiments) qui retournent une bonne partie de l'énergie incidente vers le capteur.



Les voies de circulation sont encore visibles. On remarque une voie ferrée surélevée (C) allant du sud-ouest au nord-est. Les fermes qui n'ont pas été inondées (D) produisent une rétrodiffusion très variable, causée par le taux d'humidité dans le sol et la rugosité de la surface.

5.5.2 Humidité du sol

Contexte général

L'humidité du sol est une mesure importante pour la détermination du potentiel de production d'une culture au Canada comme dans des pays souvent menacés de sécheresse. Elle est aussi importante dans la modélisation des bassins de drainage où l'humidité dans le sol reflète la quantité d'eau présente dans les deux premiers mètres du sol. Cette humidité est toutefois susceptible de s'évaporer dans l'atmosphère. La détection rapide de conditions d'assèchement (qui peuvent nuire aux cultures ou qui peuvent indiquer le début d'une sécheresse) permet d'améliorer la production agricole et de faire des prévisions quant au volume et à la qualité des récoltes. La détection rapide de risques permet de prévenir les producteurs agricoles et aide à la planification de l'aide humanitaire. L'humidité du sol aide aussi dans la prédiction d'inondations, car un sol saturé ne peut pas absorber plus de pluie ou d'eau de ruissellement. L'humidité du sol est un paramètre important dans la modélisation du drainage qui peut fournir de l'information sur le potentiel hydroélectrique et d'irrigation d'un bassin. Dans les régions de déforestation active, les évaluations de la teneur en humidité du sol aident à la prévision du volume de ruissellement, des taux d'évaporation et de l'érosion du sol.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection permet de mesurer l'humidité du sol sur une grande superficie, contrairement aux mesures au sol qui donnent seulement des valeurs ponctuelles. Le radar est un excellent outil pour obtenir des mesures quantitatives et des images qualitatives, car la rétrodiffusion du radar dépend de l'humidité du sol, ainsi que de la topographie, de la rugosité de la surface, et de la quantité et du type de couvert végétal. Si les quatre derniers paramètres demeurent inchangés, les images radars multitemporelles peuvent démontrer le changement de la teneur en humidité du sol avec le temps. Le radar est sensible à la constante diélectrique du sol qui est une fonction du taux d'humidité.

Les commissions agricoles, commerciales et administratives, les courtiers en matières premières, les gestionnaires de fermes à grande échelle, les gestionnaires de conservation et les producteurs d'énergie hydroélectrique sont tous des utilisateurs d'informations dérivées des données de télédétection sur le taux d'humidité du sol.

Exigences des données

Un capteur doit évidemment être sensible au taux d'humidité du sol. Le radar est donc plus utile que les capteurs optiques pour cette application. L'acquisition régulière et fréquente d'images est nécessaire durant la saison de croissance pour suivre les changements dans le taux d'humidité. Une livraison rapide des données est requise pour permettre aux producteurs de réagir à temps pour corriger la situation (sol saturé ou trop sec). En utilisant des images à haute résolution, le producteur agricole peut cibler les corrections de façon plus précise. Une couverture régionale permet un aperçu global du sol et des conditions de croissance pour les besoins des commissions agricoles et des gestionnaires.

Le Canada et les autres pays

Les données nécessaires pour cette application sont les mêmes partout dans le monde. Mais une plus haute résolution peut être nécessaire en Europe et en Asie du Sud-Est, où la dimension des champs et des parcelles est beaucoup plus petite qu'en Amérique du Nord.

Étude de cas**La répartition des précipitations, Melfort, Saskatchewan, Canada**

Cette image radar a été acquise le 7 juillet 1992, par le satellite ERS-1 de l'Agence Spatiale Européenne (ASE). L'image synoptique de la région près de Melfort, Saskatchewan, illustre les effets d'une précipitation locale avec la rétrodiffusion des micro-ondes enregistrée par le capteur.



Les régions où il a plu récemment paraissent plus brillantes (moitié inférieure), alors que les régions qui n'ont pas reçu de précipitations (moitié supérieure) paraissent plus foncées. Ce résultat est dû à la constante diélectrique du sol, qui est une mesure des propriétés électriques des matériaux de surface. Les propriétés diélectriques d'un matériel influence sa capacité d'absorption de l'énergie micro-onde, et donc, influencent de façon importante la diffusion de l'énergie micro-onde.

La rétrodiffusion radar est proportionnelle à la constante diélectrique de la surface. Pour des matériaux naturels et secs, les valeurs se situent entre 3 et 8, et peuvent s'élever jusqu'à 80 pour des surfaces saturées en eau. Donc, plus basse est la constante diélectrique, plus l'énergie incidente est absorbée, et plus la cible paraîtra foncée sur l'image.

5.6 Glaces océaniques



Pour les habitants des pays nordiques, la glace est un phénomène commun qui affecte leurs activités locales. La plupart d'entre nous ne considérons pas cependant les implications de la glace océanique à l'échelle régionale et à l'échelle nationale. La glace recouvre une partie importante de la surface de la Terre et constitue une préoccupation majeure pour les industries de la pêche et du transport maritime, pour la garde côtière, les projets de construction maritime pour les études sur les changements climatiques au niveau du globe. La glace océanique polaire couvre de façon saisonnière une région égale à la superficie du continent nord américain, soit 25 millions de km².

À cause de son étendue considérable, la glace océanique joue un rôle majeur dans la valeur d'albédo de la surface de la Terre (l'albédo est la mesure du taux de réflexivité d'une surface). La neige et la glace réfléchissent beaucoup de lumière, et les changements dans leur distribution affectent la quantité d'énergie solaire absorbée par la Terre. Quand le climat se réchauffe, la banquise fond et une moins grande quantité d'énergie solaire est réfléchi, ce qui peut augmenter le rythme du réchauffement. Le contraire peut aussi se produire : une augmentation de la dimension de la banquise causée par un refroidissement peut réfléchir encore plus de rayonnement solaire et ainsi augmenter le rythme du refroidissement. Évidemment, les changements potentiels dans la distribution de la glace océanique constitue une préoccupation pour les scientifiques qui étudient les changements climatologiques et les interactions entre l'océan et l'atmosphère.

Durant l'hiver de l'hémisphère Nord, la glace sur les lacs et les océans crée une barrière considérable pour les bateaux qui tentent de se rendre à un port ou qui naviguent le long des côtes. Les masses de glaces, les banquises et les icebergs sont une source de dangers pour les navires, tandis que la glace côtière bloque l'accès aux ports. Des brise-glace sont souvent utilisés pour frayer un passage aux navires entre les ports et l'eau libre. Le golfe du Saint-Laurent et l'océan Arctique sont deux régions de glace importantes au Canada. Le golfe est la voie maritime la plus importante au Canada, car il donne accès aux ports de Montréal, de Québec et des Grands Lacs. La glace bloque le golfe durant l'hiver et le printemps. Les importantes réserves de minéraux et de pétrole de l'Arctique canadien requièrent du transport maritime pour la construction, l'équipement, les provisions et le transport des ressources vers

les raffineries et les régions urbaines. L'approvisionnement des communautés nordiques dépendent également des navires. L'information sur les conditions, le type, la concentration et le mouvement de la glace dans ces régions de l'Arctique et du golfe du Saint-Laurent est donc très importante.

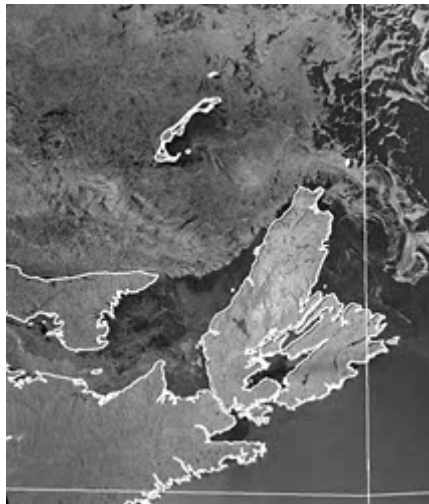
Les cartes de types de glaces, les bulletins des risques quotidiens, les prévisions saisonnières ainsi que des moyens de soutien pour les observations sont donc des outils indispensables pour la navigation. Au Canada, le Service canadien des glaces est responsable de l'acquisition et de la distribution de cette information et de ces produits. Il maintient aussi des archives d'information sur les glaces comportant des données utiles pour les évaluations d'impact sur l'environnement, l'évaluation des risques, la planification des routes (saisonnières et à court terme) pour les navires, le transport efficace des ressources et le développement des infrastructures.

Les données de télédétection peuvent être utilisées pour identifier et cartographier les différents types de glaces, pour localiser les chenaux (de grosses fissures navigables) et pour surveiller le mouvement des glaces. La technologie moderne permet de livrer les données aux utilisateurs peu de temps après l'acquisition. La Garde côtière, les autorités des ports, les industries de transport maritime et de pêche, les constructeurs de navires, les gestionnaires de ressources (pétrole, mines), les compagnies de construction d'infrastructures, les consultants en environnement, les agents d'assurances maritimes, les scientifiques et les même les agences touristiques utilisent tous ce genre d'information.

Voici quelques exemples des applications de l'information sur les glaces de mer :

- la concentration de la glace
- le type, l'âge et les mouvements de la glace
- la détection et la surveillance des icebergs
- la topographie de surface
- l'identification des chenaux pour la navigation, le transport et les services de secours
- la condition de la glace
- l'historique des conditions et la dynamique des glaces et des icebergs pour la planification
- l'habitat de la faune
- la surveillance de la pollution
- la météorologie et les recherches sur les changements climatiques.

5.6.1 Type de glace et sa concentration



Contexte général

Les bateaux naviguant dans les mers polaires (nord et sud) rencontrent souvent des obstacles formés par une banquise et des masses de glace. Les brise-glace ont été conçus pour faciliter la navigation dans ces régions, mais les pilotes des bateaux doivent connaître la route la plus praticable parmi les glaces. Il est important de connaître l'étendue du champ de glace, quel type de glace est présent, ainsi que la concentration et la distribution de chaque type. Cette information est importante aussi pour l'exploration et les activités de construction au large, et pour la planification du développement côtier.

La glace n'est pas que de la glace!

La glace de mer n'est pas une matière uniforme et homogène. Ce qui semble être une seule couverture de glace peut varier en rugosité, en force, en salinité et en épaisseur. Les banquises et les masses de glace sont un ensemble de fragments disparates de différents types de glace, traversés de chenaux et de fissures dynamiques. La glace est habituellement définie par son âge : soit la glace nouvelle, de première année et de plusieurs années. La glace nouvelle est lisse et relativement mince (5 à 30 cm), et offre le moins de résistance aux brise-glace. La glace de première année est plus vieille et plus épaisse (30 à 200 cm), et peut représenter un danger pour tous les navires, même les brise-glace. Quand cette glace est déformée en champs de blocs et de crêtes, elle devient impraticable. La glace qui survit jusqu'à une deuxième année ou plus, devient plus épaisse (plus de 2 m) et de salinité réduite, ce qui augmente sa résistance. Cette glace est très dangereuse pour les navires et les constructions au large. Les cartes de glace distribuées à ceux qui travaillent dans un environnement maritime affecté par la présence de glace, illustrent les types de glace et leurs concentrations.

Pourquoi la télédétection?

Il est plus facile d'observer les conditions de glace à partir du sol, mais cette méthode ne permet pas de déterminer l'étendue et la distribution de la glace. La télédétection par les

capteurs aériens et satellitaires fournit cette information importante. Les régions couvertes de glace sont facilement cartographiées à partir d'une image qui, lorsqu'elle est géoréférencée, constitue une source d'information utile. La technologie de télédétection peut produire assez d'information pour qu'un analyste puisse identifier le type de glace et en déduire l'épaisseur. Des cartes comportant cette information peuvent être créées et distribuées à ceux qui en ont besoin.

Les radars actifs sont d'excellents systèmes pour observer les conditions de glace, car l'énergie micro-onde et la géométrie d'acquisition permettent de mesurer des caractéristiques internes et de surface. La rétrodiffusion est influencée par les propriétés diélectriques de la glace (qui dépendent de la salinité et de la température de la glace), par les facteurs de surface (rugosité et quantité de neige), par la géométrie interne et la microstructure. C'est la texture de surface qui contribue le plus à la rétrodiffusion radar et elle est utilisée pour établir l'âge et l'épaisseur de la glace. La glace nouvelle produit une faible rétrodiffusion et paraît plutôt foncée sur une image à cause de la réflexion spéculaire de l'énergie incidente sur une surface lisse. La réflexion de la glace de première année peut varier grandement selon le degré de rugosité causée par les crêtes et les collisions. La glace de plusieurs années produit une forte rétrodiffusion en raison de la réflexion diffuse causée par son taux de salinité inférieur et sa structure poreuse.

Les capteurs de faible résolution spatiale, comme le NOAA-AVHRR (résolution = 1 km), produisent une excellente vue d'ensemble de l'étendue des banquises si les conditions atmosphériques le permettent.

Les capteurs à micro-ondes passifs jouent aussi un rôle dans les applications à la glace de mer. Les objets (et les humains...!) émettent de petites quantités de rayonnement micro-onde qui peuvent être détectées par ces capteurs. La glace de mer et l'eau émettent des quantités très différentes de rayonnement micro-onde. Il est donc facile de délimiter l'interface entre les deux. Le SSM/I à bord de la navette spatiale a recueilli des données de cette façon. Le désavantage majeur de ces capteurs est leur faible résolution spatiale (plus de 25 km), qui s'avère beaucoup trop grossière pour la navigation dans les glaces.

Exigences des données

La glace océanique est présente dans les régions de latitude élevée : dans l'Arctique et l'Antarctique. Mais la glace recouvre également les voies primaires de transport maritime et lacustre dans les pays nordiques, particulièrement le Canada, la Russie, le Japon, le nord de l'Europe et les pays scandinaves. Les régions de latitude élevée reçoivent peu de rayonnement solaire durant l'hiver quand la glace est à son maximum. Ce manque d'illumination a nui à l'efficacité de la télédétection, jusqu'à l'arrivée des capteurs radars qui, par leur capacité d'acquérir des images le jour et la nuit et dans toutes les conditions météorologiques, s'avèrent les capteurs idéaux pour la cartographie de la concentration et des types de glace.

Pour fournir l'information pouvant faciliter la navigation, l'acquisition des données doit se faire

fréquemment et le traitement et la distribution des données doivent se faire dans un court délai après leur acquisition. Les données à haute résolution, qui couvrent entre 1 et 50 km², servent à la navigation, tandis que les images à faible résolution (100 à 2000 km²) sont plus utiles pour la planification à l'échelle régionale. Pour la navigation, la validité de cette information est de courte durée. Néanmoins, ces données ont une valeur à long terme, car elles augmentent nos connaissances de la dynamique du climat et de la glace comme indicateurs des changements climatiques mondiaux.

Les paramètres orbitaux et le capteur RSO de RADARSAT ont été conçus pour répondre aux exigences des applications de la glace. RADARSAT survole l'Arctique une fois par jour. Des systèmes de traitement ont été développés afin de transmettre les données directement des installations de traitement aux navires qui en ont besoin et ce, en moins de quatre heures. Les capteurs radars aéroportés sont utiles, car ils peuvent cibler des régions spécifiques et fournir des images à très haute résolution, ce que ne peuvent faire les plates-formes satellitaires commerciales. Le radar aéroporté est plus dispendieux, mais permet de cibler une région spécifique, ce qui est important pour obtenir les informations indispensables à la navigation dans la glace dynamique. L'hiver est la saison idéale pour l'acquisition des scènes radars pour la classification de la glace. Les conditions printanières de fonte et d'humidité réduisent le contraste entre les différents types de glace, ce qui rend l'extraction de l'information plus difficile.

De futurs outils de télédétection sont prévus afin de fournir des mesures détaillées sur l'étendue de la glace de mer.

5.6.2 Mouvements de la glace

Contexte général

La glace bouge rapidement et parfois de façon imprévisible, réagissant aux courants marins et aux vents. Les masses de glace bougent comme des plaques tectoniques, se séparant parfois comme les rides océaniques, entrant en collision (comme les plaques indiennes et asiatiques) et créant ainsi une version miniature de l'Himalaya. Ces petites montagnes sont formées par des séries de crêtes, de blocs et de gravats de glace. Les navires peuvent être emprisonnés et même endommagés par les pressions exercées par ces masses de glace en mouvement. Même les structures au large peuvent être endommagées par la force et la vitesse de la glace en mouvement. Pour ces raisons, il est important de comprendre la dynamique des glaces dans les zones de construction, de transport ou de pêche.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection, avec la cartographie et les techniques de détection des changements, permet de mesurer de façon tangible la direction et la vitesse de mouvement de la glace. Les masses de glace possèdent des caractéristiques morphologiques (forme et structure) qui permettent de les distinguer. Ces masses peuvent être cartographiées et leurs mouvements suivis pour faciliter la planification des voies de transport, et pour prédire l'effet de la glace en mouvement sur les structures fixes (ponts, plates-formes). Les industries de la pêche, du transport et du tourisme, ainsi que les firmes d'ingénieurs spécialisées dans la fabrication et l'entretien des ponts et des plates-formes utilisent tous les données de télédétection.

Exigences des données

La surveillance du mouvement des glaces requiert des images fréquentes et fiables. La fréquence de répétitivité doit être élevée pour permettre de suivre des traits identifiables avant que les mouvements excessifs et les changements de forme ne rendent l'opération difficile. Les capteurs RSO sont une source fiable d'images sous toutes conditions météorologiques et sous toutes conditions de luminosité. RADARSAT facilite les opérations d'acquisition d'images de façon routinière. L'orbite du satellite assure une couverture journalière de l'Arctique et permet donc, une bonne fréquence d'acquisition d'images.

La résolution et la fréquence des images pour la surveillance des glaces en mouvement varient avec la dimension des masses et la dynamique d'une région. Dans les régions où les masses bougent lentement, comme dans la mer de Beaufort, des données de résolution de 1 km à des intervalles de dix jours sont suffisantes, alors que dans les régions de glace dynamique, comme le golfe du Saint-Laurent, des données de 100 mètres de résolution, acquises à toutes les 12 à 24 heures sont nécessaires.

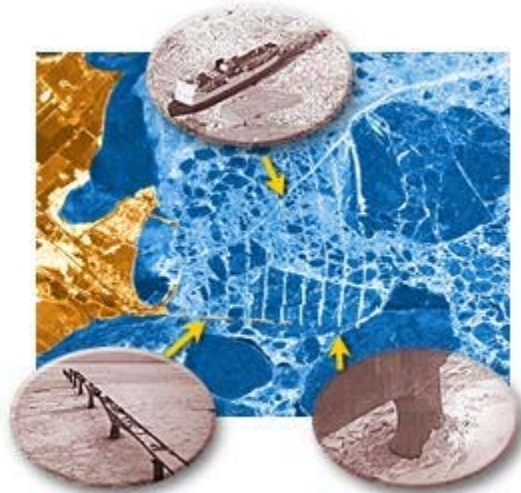
Étude de cas

La force et les effets potentiels du mouvement des glaces se sont révélés récemment lors de la planification et la construction du pont de la Confédération, au-dessus du détroit de Northumberland. Ce pont constitue un lien fixe de 13 km entre l'Île-du-Prince-Édouard et le Nouveau-Brunswick. Le pont traverse un détroit où des masses de glace bougent. Au gré des

vents, des courants et des marées à travers un bras étroit du golfe du Saint-Laurent. Le pont doit pouvoir résister aux forces et aux pressions énormes des glaces qui frappent ses piliers.

« La somme des efforts portés à l'aspect ingénierie des glaces pour ce pont, dépassent les efforts déployés pour toute autre structure de ce genre construite auparavant. » **Dr. Gus Cammaert**

Les courants océaniques et les vents produisent une dynamique très complexe sur les masses de glace du détroit de Northumberland. Il en résulte des collisions de compression qui fracturent des masses de glace en morceaux qui peuvent s'élever jusqu'à 20 mètres au-dessus et au-dessous du niveau de l'eau. Ces masses pourraient endommager fortement toutes structures résistant à son mouvement dans le détroit. La planification et la conception du pont devaient tenir compte de l'épaisseur et du mouvement constant de la glace. Les informations contenues dans les archives du Service canadien des glaces a contribué à la compréhension de la dynamique des glaces dans le détroit.



Au cours de la construction, une image radar du pont a été acquise pour observer de quelle façon les piliers du pont affectent le mouvement des masses de glace autour du site. La forme conique des piliers au niveau de l'eau force la glace à se plier, à se briser en morceaux et à se disperser de part et d'autre des piliers. Sur cette image, nous pouvons déduire la direction du mouvement de la glace sans avoir recours à des scènes multitemporelles; le sillage des glaces très visible créé par les piliers, nous indique que la glace se déplace du bas vers le haut de l'image.

La télédétection sera utilisée pour effectuer la surveillance des effets du pont sur le mouvement de la glace et pour s'assurer que les accumulations de glace ne deviennent pas trop importantes. Comme on peut le constater sur l'image, le pont aura des répercussions sur la dynamique de la glace. Le pont brise les grosses masses de glace en plus petits morceaux qui s'accumulent en piles de chaque côté. Cet effet sera surveillé, en plus des effets sur le microclimat qui pourrait affecter les industries de pêche et d'agriculture de l'Île-du-Prince-

Édouard.

Site Web du pont :

Référence: Thurston, H., 1997. Strait Across, Canadian Geographic, Vol. 117, No.2, March-April 1997.

Pour plus de renseignements sur des applications à la dynamique des glaces, vous pouvez également visiter le site Internet du Service canadien des glaces, Environnement Canada à l'adresse :

 <http://ice-glaces.ec.gc.ca/App/WsvPageDsp.cfm?ID=1&Lang=fr>

5.7 Couverture et l'utilisation du sol



Même si les termes couverture du sol et utilisation du sol se ressemblent, ils ont des définitions très différentes. La couverture du sol fait référence à la couverture de la surface sur le sol, que ce soit de la végétation, des infrastructures, de l'eau, le sol nu ou autres. L'identification, le tracé et la cartographie de la couverture du sol sont importants pour les études de surveillance planétaire, de gestion des ressources et de planification d'activités. L'identification de la couverture du sol établit la ligne de base à partir de laquelle des activités de suivi (et de détection) des changements peuvent être effectuées, et fournir des informations préliminaires pour les cartes thématiques.

L'utilisation du sol fait référence à l'usage qu'on fait du sol, par exemple les loisirs, l'habitat de la faune ou l'agriculture. L'application de l'utilisation du sol comprend la cartographie de base ainsi que la surveillance qui en découle, puisque des informations adéquates sont nécessaires pour connaître quelle superficie de sol correspond à quel type d'utilisation, ainsi que pour identifier les changements d'utilisation au fil des ans. Ces connaissances vont aider au développement de stratégies visant à équilibrer les utilisations conflictuelles et les pressions de l'urbanisation. La disparition et les perturbations des terres arables, l'urbanisation et la détérioration des forêts sont des sujets qui stimulent le développement d'études sur de l'utilisation du sol.

Il est donc important de faire la distinction entre la couverture du sol et l'utilisation du sol, ainsi que les informations que nous pouvons en retirer. Les propriétés mesurées par la télédétection se rapportent à la couverture du sol, à partir de laquelle l'utilisation du sol peut être déduite à l'aide de données auxiliaires ou de connaissances préalables.

L'étude de la couverture et de l'utilisation du sol est multidisciplinaire. Les participants impliqués dans ce genre d'études sont nombreux et très variés, mentionnons entre autres : les organismes internationaux de préservation de la faune et de conservation les centres de recherche gouvernementaux et l'industrie forestière. Les agences gouvernementales

régionales ont besoin d'inventaires des couvertures du sol et de suivi des utilisations du sol pour mener à bien leur mandat de gestionnaire des ressources naturelles de leurs régions respectives. En plus de faciliter la gestion durable des terres, la couverture et l'utilisation du sol peuvent être utilisées pour la planification, la surveillance et l'évaluation de développement, de l'activité industrielle ou des réclamations. La détection de changements des couvertures du sol à long terme peut indiquer une réaction à des modifications des conditions climatiques locales ou régionales qui sont la base même de la surveillance à l'échelle du globe.

Les négociations en cours concernant les réclamations des terres par les autochtones ont engendré un besoin de connaissances plus précises sur ces territoires, tant au niveau de l'information cartographique que thématique.

Les gestionnaires de ressources qui travaillent avec des compagnies d'exploitation de ressources telles que le pétrole, le bois et les mines, sont soucieux des couvertures et des utilisations du sol tout comme les agences d'inventaires de ressources naturelles locales. Les changements dans la couverture du sol intéressent les scientifiques, et les gestionnaires de la conservation ainsi que les intervenants municipaux qui sont intéressés à établir le niveau des taxes ou la cartographie de la végétation. Les gouvernements sont également soucieux de la protection des ressources naturelles et s'engagent dans des activités de sensibilisation du grand public aux problèmes des sols.

Voici une liste de quelques applications de la télédétection pour l'utilisation du sol :

- la gestion des ressources naturelles
- la protection de l'habitat sauvage
- la cartographie de base pour des données SIG
- l'expansion et le développement urbains
- la planification des itinéraires et de la logistique pour les activités d'exploration sismique et d'extraction de ressources
- la délimitation de l'étendue de dommage (tornades, inondations, volcans, tremblements de terre, feux)
- la détermination des limites légales pour l'évaluation des taxes et des propriétés
- la détection de cibles - l'identification de pistes d'atterrissage, de routes, de clairières, de ponts, de l'interface terre-eau.

5.7.1 Changements d'utilisation du sol (rural/urbain)

Contexte général

Comme la population de la Terre augmente et que les économies nationales continuent de s'éloigner d'un système basé sur l'agriculture, les villes prennent constamment de l'expansion. La croissance urbaine s'effectue souvent au détriment des terres agricoles ou des forêts productives envahies par ces irrésistibles poussées d'urbanisation. La croissance des villes est un indicatif du développement de l'industrialisation et elle a généralement un impact négatif sur la santé environnementale d'une région.

Le passage de l'utilisation rurale du sol à une utilisation urbaine, est surveillé de manière à estimer la population, prévoir et planifier la direction de la croissance urbaine et pour effectuer le suivi des régions sensibles à certains dangers sur le plan environnemental. L'établissement de refuges temporaires peut être surveillé, et la densité et l'importance d'une population peuvent être estimées.

L'analyse de changement d'utilisation du sol est importante afin d'assurer que le développement urbain n'empiète pas sur les précieuses terres agricoles et que l'agriculture se développe dans les endroits les plus appropriés pour éviter une dégradation due au voisinage urbain.

Pourquoi la télédétection?

Avec des analyses multitemporelles, la télédétection offre une perspective unique sur la façon dont les villes se développent. L'élément clé pour cartographier les changements d'utilisation du sol, de rurale à urbaine, est la capacité de distinguer entre les utilisations rurales (l'agriculture, les pâturages, les forêts) et les utilisations urbaines (résidentielle, commerciale, récréative). Les méthodes de télédétection peuvent être utilisées au-dessus de grandes régions pour effectuer la classification des types d'utilisation du sol de façon pratique, économique et de manière répétitive.

Exigences des données

La détection et la cartographie des changements d'utilisation du sol doivent satisfaire deux exigences : une haute résolution spatiale afin d'obtenir des informations détaillées, et des données multispectrales optiques afin de faire la distinction entre les différentes classes d'utilisation du sol.

Les détecteurs opérationnels dans les zones visible et infrarouge du spectre sont les sources de données les plus utiles pour l'analyse de la couverture et de l'utilisation du sol. Alors que plusieurs caractéristiques urbaines peuvent être détectées par l'imagerie radar ou autres (grâce à une grande réflectivité), les données VIR à haute résolution permettent une distinction plus fine de la couverture et de l'utilisation du sol, ce qui permet une identification plus sûre de la banlieue urbaine et des classes de transition allant de l'urbain au rural. Les images optiques acquises pendant les mois d'hiver sont également utiles pour tracer la frontière entre les régions urbaines et non urbaines. Les villes apparaissent de façon

contrastée par rapport aux champs couverts de neige dont la texture est lisse.



Les capteurs radars sont également utiles pour le tracé des applications rurales et urbaines grâce à leur sensibilité aux formes géométriques qui permet de détecter les éléments anthropogéniques comme les édifices. L'arrangement géométrique optimal entre le capteur et la région urbaine est une orientation linéaire, parallèle au mouvement du capteur, et perpendiculaire à l'énergie (L) incidente reçue.

Généralement, ce type d'application ne nécessite pas un délai de traitement et de livraison court, ou une fréquence d'acquisition élevée.

Le Canada et les autres pays



Les conditions atmosphériques (couverture nuageuse) au-dessus d'une région provoquent une différence significative dans les exigences pour le tracé urbain, à travers le monde entier. Les régions souvent ennuagées font appel à la capacité du radar de pénétrer les nuages, alors que les régions jouissant d'un ciel dégagé peuvent utiliser des photos aériennes, optiques ou radars. Les pratiques d'utilisation de sol pour les régions rurales et urbaines variant considérablement d'une région du monde à l'autre, les exigences pour les techniques de télédétection utilisées (sauf en cas de couverture nuageuse) sont orientées vers une résolution spatiale fine.

Étude de cas

Cette image de changements dans la couverture du sol fournit de l'information multitemporelle sous forme de cartographie de la croissance urbaine. Les couleurs représentent la couverture du sol pour deux années différentes. Le vert montre les régions urbaines de 1973, et le rose, les régions urbaines de 1985. Cette image montre de façon spectaculaire le changement dans le développement des régions urbaines actuelles et le défrichement de nouvelles terres pour divers établissements sur une période de douze ans. Ce genre d'information est utile pour l'amélioration des services gouvernementaux, la planification du développement routier, etc.

5.7.2 Couverture du sol et la cartographie de la biomasse

Contexte général

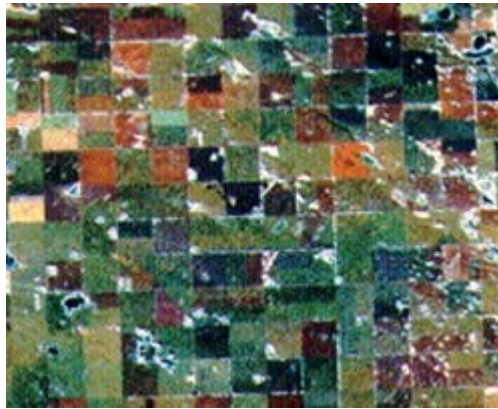
La cartographie de la couverture du sol sert d'inventaire de base des ressources du sol pour des organismes gouvernementaux à tous les niveaux, pour les agences environnementales et pour le secteur privé à travers le monde. La télédétection offre un moyen efficace d'acquisition et de présentation de données de couverture du sol tant au plan régional que local. Les couvertures du sol comprennent tous les types de cultures, la glace et la neige, les grands biomes, comme la toundra, la forêt boréale, la forêt tropicale et les terres arides.

La cartographie de la couverture du sol à l'échelle régionale intéresse quiconque cherche à obtenir un inventaire des ressources du sol, pour en assurer le suivi et la gestion. Des programmes sont gérés à travers le monde pour observer les conditions régionales des cultures ainsi que pour étudier les changements climatiques au moyen de la surveillance des biomes au niveau régional. La cartographie de la biomasse fournit des estimations quantifiables de la couverture de la végétation, et des informations biophysiques comme l'indice foliaire (IF), la production primaire brute (PPB) et des mesures d'accumulation de biomasse totale (ABT) - tous des paramètres importants pour mesurer, par exemple, la santé de nos forêts.

Pourquoi la télédétection?



Rien n'est plus pratique et économique pour obtenir une perspective régionale de couverture du sol que la télédétection. Les données de télédétection permettent d'observer les changements dans la phénologie (croissance) des plantes au cours des saisons de croissance, tant au niveau du changement du contenu de chlorophylle (discernable avec VIR) qu'à celui du changement de structure (avec le radar). La cartographie régionale nécessite une couverture spatiale continue au-dessus de grandes régions. Il serait difficile de discerner des tendances avec des points comme sources de données. La télédétection satisfait cette exigence et fournit aussi de l'information multispectrale, multicauteurs, et multitemporelle pour une classification exacte de la couverture du sol. L'image multisources qui permet l'intégration de deux sources de données a l'avantage d'augmenter le contenu en information. À gauche, on retrouve des données TM, et à droite ces données ont été fusionnées avec le RSO aéroporté.



Exigences des données

Pour des études de végétation à l'échelle continentale ainsi qu'à l'échelle du globe, des données à résolution moyenne (1 km) sont acceptables puisque qu'elles demandent moins d'espace de stockage et moins d'effort de traitement de données, ce qui a une portée significative lorsque de très grandes régions sont traitées. Évidemment, les exigences dépendent entièrement du domaine d'application. Par exemple, la cartographie des marécages exige une période d'acquisition considérable ainsi qu'une haute résolution.

La demande de couverture peut être très grande pour des types de levés régionaux. Pour couvrir une grande région tout en conservant une haute résolution, on crée une mosaïque de la région à partir d'une série de scènes.

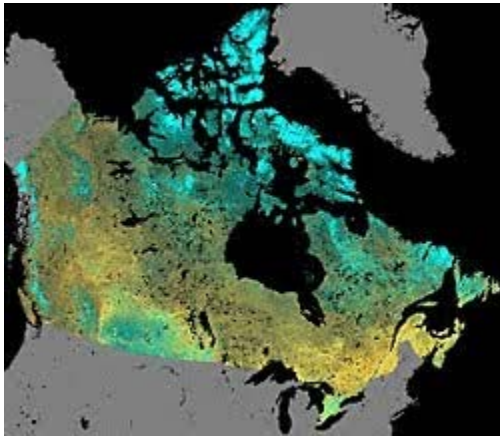
L'information sur la couverture du sol peut varier avec le temps. L'identification de cultures, par exemple le canola, peut exiger l'acquisition d'images lors d'une journée spécifique de floraison; l'acquisition d'images fiables s'impose donc. Les données multitemporelles sont préférables pour capter des changements phénologiques durant la saison de croissance.



Bien que la supériorité des données optiques soit indéniable pour la cartographie de la couverture du sol, les images radars n'en demeurent pas moins utiles dans les régions nuageuses.

Étude de cas

NBIOME : La classification de la couverture du sol du Canada



Un des grands projets du Centre canadien de télédétection est le développement d'une classification objective et reproductible des couvertures du sol du Canada. Cette méthodologie est utilisée pour la production de cartes d'information de base sur les grands biomes et les couvertures du sol du Canada, qui pourra par la suite être comparée aux classifications subséquentes de façon à observer les changements de couverture. Ces changements peuvent être attribués à des changements climatiques régionaux ou à des changements

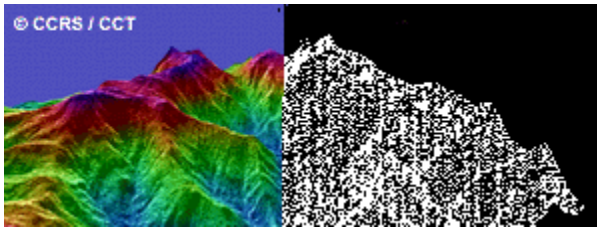
anthropogéniques.

La classification est basée sur des données NOAA-AVHRR LAC (Local Area Coverage) à résolution de 1 km). Lorsque de grandes régions sont étudiées, On utilise une faible résolution pour assurer l'efficacité du traitement et du stockage des données. Avant de procéder à la classification, on crée des images-synthèses temporelles ayant une couverture nuageuse réduite, chacune correspondant à une période de dix jours. Parmi les images-synthèses, on choisit pour chaque pixel, les journées présentant le moins de nuages. Ce choix est guidé par la plus grande différence des valeurs de l'indice de végétation (NDVI). Les valeurs basses indiquent une couverture nuageuse (basse réflexion d'infrarouge, grande réflexion visible). Les données subissent également un traitement pour minimiser les effets atmosphériques, bidirectionnels et de contamination.

Les images-synthèses comprennent quatre bandes : les réflexions moyennes des bandes 1 et 2 du AVHRR, le NDVI et l'aire sous la courbe. En 1993, seize images-synthèses ont été incluses dans une procédure de classification de couverture du sol (nommée classification par généralisation progressive), qui n'est pas une classification supervisée ni une classification non supervisée, mais qui incorpore des aspects de ces deux méthodes. L'approche de la classification consiste à trouver les regroupements spectraux dominants et ensuite d'y inclure la méthodologie de façon progressive. Éventuellement, les regroupements spectraux sont associés aux classes de couverture du sol appropriées. L'avantage de cette classification est qu'elle est plus objective qu'une approche supervisée où on ne contrôle pas les paramètres des regroupements qui pourraient modifier les résultats.

Le résultat de ce travail est une classification objective et reproductible des couvertures du sol au Canada.

5.8 Mapping



La cartographie est une composante intégrale du processus de gestion des ressources terrestres, et l'information cartographique est un produit courant de l'analyse des données de télédétection. Les éléments naturels et les infrastructures artificielles, comme les réseaux de transport, les centres urbains et les frontières administratives, peuvent être représentés spatialement par rapport à des systèmes de coordonnées connus, et peuvent, par la suite, être combinés à de l'information thématique. Des cartes d'information de base, thématique, et topographique sont essentielles à la planification, à l'évaluation et à la surveillance, en vue de la reconnaissance militaire et civile, de la gestion de l'utilisation du sol, particulièrement si les données sont intégrées dans un système d'information géographique comme informations de base. L'intégration de l'information sur l'altitude est cruciale pour plusieurs applications et est souvent la clé du succès des programmes de cartographie d'aujourd'hui.

Le Canada a toujours été un des leaders mondiaux dans le domaine de la technologie de la cartographie. La grande superficie et le potentiel des ressources naturelles du Canada, jumelés à un faible taux de population, ont forcé le développement de mécanismes efficaces et minutieux d'investigations et d'enregistrement de l'information. Traditionnellement, cette information était obtenue au moyen de levés et de techniques photogrammétriques qui étaient dispendieuses et qui exigeaient beaucoup de temps, particulièrement pour la révision des données désuètes. Les récents développements de la technologie informatique (vitesse, traitement des données, capacité de stockage), la demande croissante pour les données numériques et les capacités de production cartographique informatisée, ont favorisé l'utilisation de l'information de télédétection comme source de données pour les applications cartographiques.

La demande croissante pour l'utilisation des données de télédétection pour la cartographie se justifie par les nombreux avantages qu'elle offre, notamment :

- une couverture stéréo
- une répétitivité fréquente
- une livraison rapide
- une couverture régionale
- des coûts de main-d'oeuvre peu élevés
- une couverture du globe quasi totale
- le stockage numérique
- une intégration facile au SIG
- une mise à jour facile

Les compagnies d'exploitation de ressources naturelles (forestière, minière, pétrolière), les industries de support et service (génie), les agences de développement d'infrastructures et de services publics (pipelines, hydroélectricité, télécommunications, transport), les agences de cartographie gouvernementales, et les militaires utilisent et produisent tous des produits cartographiques. La diversification des utilisateurs et la commercialisation d'applications auparavant réservées aux militaires, a créé une demande pour une vaste gamme de produits cartographiques. L'emphase est maintenant mise sur les avantages de l'amélioration du contenu et de l'échelle de l'information, et sur la précision plutôt que sur le coût des données.

Les compagnies canadiennes qui offrent des services de cartographie envisagent les marchés extérieurs, car le potentiel commercial y est important. Les pays en voie de développement sont présentement en train de mettre sur pied des programmes pour la cartographie de région où l'information est de mauvaise qualité ou inexistante, dans le but d'augmenter leurs connaissances en topographie et en planimétrie. L'information dérivée servira à étayer les questions de souveraineté territoriale, à évaluer et surveiller le potentiel et l'exploitation des ressources, et à stimuler l'économie. Les données radars seront recherchées pour la cartographie par télédétection des régions tropicales.

Voici quelques applications cartographiques de la télédétection :

1. planimétrie
2. modèle numérique d'altitude (MNA)
3. cartographie thématique - cartographie topographique.

5.8.1 Planimétrie

Contexte général

La planimétrie est l'identification et la localisation géographique de la couverture de base du sol (forêt, marécage, etc.), du drainage et des éléments anthropogéniques (infrastructures urbaines, réseaux de transport, etc.) dans les plans x et y. L'information planimétrique est requise généralement pour les applications à grande échelle - cartographie urbaine, gestion d'installations, reconnaissance militaire et information générale sur l'environnement.

Pourquoi la télédétection?

Les techniques de levés de terrains en conjonction avec l'utilisation de GPS sont très précises, mais cette méthodologie est coûteuse et présente des problèmes pour la cartographie des régions vastes et isolées. La télédétection offre un moyen d'identifier et de présenter les données planimétriques de façon efficace et dans un format pratique. Les images sont disponibles à plusieurs échelles pour combler les besoins des différents utilisateurs. Les applications militaires sont des applications typiques de la planimétrie : elles cherchent à extraire l'information sur les réseaux de transport, sur l'emplacement des édifices et des installations, sur l'infrastructure urbaine et sur la couverture du sol en général.

Exigences des données

Des données à très haute résolution sont habituellement nécessaires pour la cartographie planimétrique de précision. La précision spatiale des données et le niveau de détail de l'information qui peut être extraite des images satellitaires sont des préoccupations constantes. Le contenu en information n'est pas seulement utile pour l'interprétation, mais aussi pour la localisation de la position spatiale exacte d'un objet. Un exemple serait la difficulté de situer le centre d'une rivière ou la position exacte des lignes de transmission électrique ou d'un pipeline en format vecteur quand on travaille à partir d'une image à résolution grossière. La résolution spatiale constitue l'élément clé pour résoudre ce type de problèmes.

Un délai de livraison d'une ou deux semaines après l'acquisition des données est généralement acceptable pour ce genre de cartographie, bien que les exigences militaires soient plus rigoureuses.

Le Canada et les autres pays

Pour les applications générales canadiennes, les capteurs VIR fournissent une bonne information planimétrique, mais pour la cartographie à grande échelle, les photos aériennes sont mieux adaptées. On favorise habituellement la résolution et la qualité de l'information plutôt que la rapidité de la livraison. Présentement, les données Landsat et SPOT offrent l'information optimale pour l'extraction de l'information planimétrique pour les applications régionales. Les photos aériennes, et particulièrement les orthophotos (quand elles sont disponibles) sont préférables pour de petites régions bien définies.

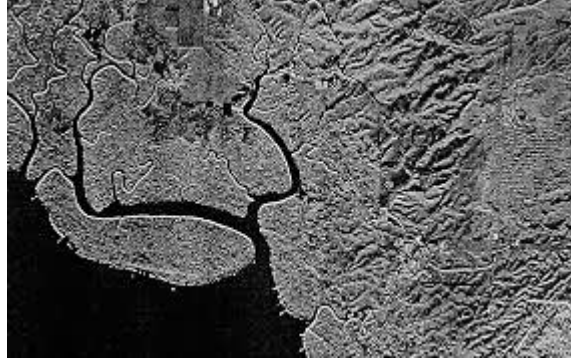
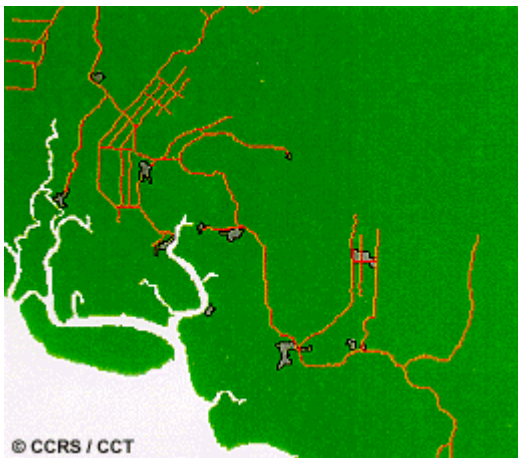


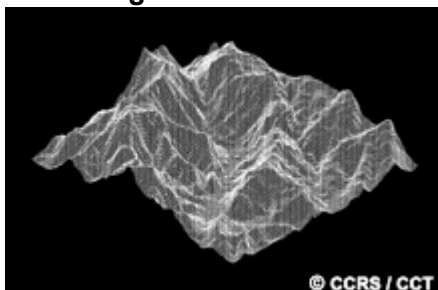
image radar de Tawausar



Pour les régions à couverture nuageuse fréquente, le radar constitue l'outil idéal pour recueillir l'**information planimétrique**. La détectabilité des éléments linéaires augmente lorsque ceux-ci sont orientés perpendiculairement à la direction de visée du radar. Pour les capteurs aéroportés, ceci peut être contrôlé par une planification adéquate des lignes de vol. La nécessité d'arriver à un équilibre entre la résolution et le chatoiement constitue un autre défi. Bien que les données à visée simple offrent la résolution la plus fine possible, le chatoiement sur ces images peut nuire à l'interprétation. Dans un tel cas, les données à visées multiples pourraient être plus appropriées.

5.8.2 Modèle numérique d'altitude

Contexte général



La disponibilité des modèles numériques d'altitude (MNA) est primordiale pour l'exécution des corrections géométriques et radiométriques du terrain sur des images de télédétection. Ces modèles permettent aussi la création de lignes de contours et de modèles de terrains, procurant ainsi une autre source d'information pour les analyses.

Les techniques de cartographie actuelles sont rarement effectuées en considérant seulement les questions planimétriques. La demande pour les MNA s'accroît avec l'utilisation plus commune des SIG et avec l'amélioration de l'information extraite des données d'altitude (cartographie des marécages et des inondations, et gestion forestière). L'incorporation des données d'altitude et de relief est critique pour plusieurs applications, particulièrement si des données radars sont utilisées, pour compenser l'effet de raccourcissement et de repliement, et les effets radiométriques causés par les pentes. Les données d'altitude sont aussi utilisées dans la production de cartes topographiques.

Les données d'altitude intégrées à des images sont aussi utilisées pour produire des vues en perspective qui sont utiles pour le tourisme, la planification de routes, le développement, pour minimiser la visibilité des coupes à blancs à partir des routes et même pour la planification des terrains de golf. Pour les applications militaires, les modèles numériques sont intégrés dans la programmation des missiles pour les guider au-dessus du terrain.

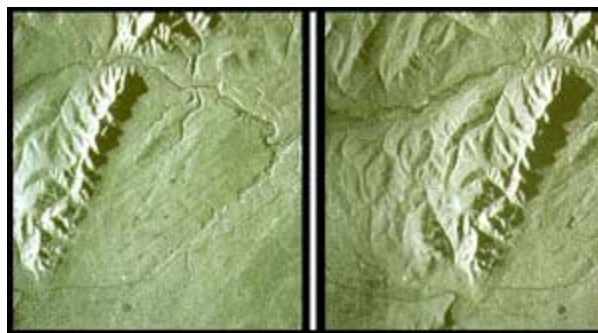
La gestion des ressources, la planification pour la télécommunication et la cartographie militaire sont quelques-unes des applications des modèles numériques.

Pourquoi la télédétection?

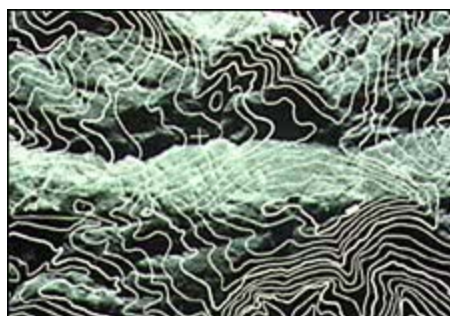
Il existe plusieurs méthodes de création des MNA. L'une consiste à créer des séries de points en recueillant des données d'un altimètre ou d'un GPS et ensuite, d'interpoler les hauteurs entre les points. Cette méthode est longue et ardue. Les levés traditionnels prennent aussi beaucoup de temps et limitent l'utilisation de la cartographie à l'échelle régionale.

La création de MNA à partir des données de télédétection se révèle efficace en coût et en temps. La télédétection dispose d'une variété de capteurs et de méthodologies pour la création de ces modèles pour les applications cartographiques. Les deux méthodes de base de création des modèles sont :

1. les techniques de stéréogrammétrie utilisant des photos aériennes (photogrammétrie), des images VIR, ou des données radars (radargrammétrie)
2. l'interférométrie radar.



La stéréogrammétrie consiste en une extraction d'information d'altitude à partir d'images stéréo qui se chevauchent, habituellement des photos aériennes, des images SPOT ou radars. Par exemple, des paires stéréo d'images RSO aéroportées sont utilisées pour trouver des points d'altitude en utilisant le concept de parallaxe. Les lignes de contours peuvent être tracées sur les images par des opérateurs qui utilisent les images en stéréo.

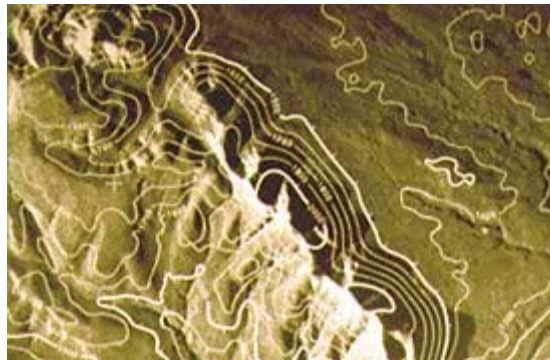


Le potentiel des techniques radars interférométriques pour trouver et mesurer de petits changements d'altitude, est de plus en plus reconnu.

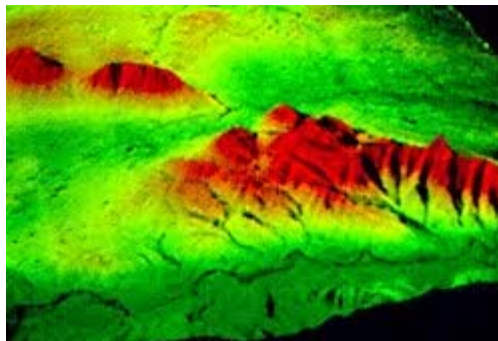
L'interférométrie implique l'acquisition de données altimétriques précises lors de passages successifs (ou une acquisition simultanée par deux antennes) d'un RSO aéroporté ou spatioporté. Deux images sont acquises à partir d'orbites ou de passages successifs. Plutôt que d'examiner les images en amplitude, on en analyse les variations de la phase du signal pour chaque pixel. Les deux images de la phase sont d'abord coréférencées, on mesure ensuite la différence de phase entre chaque pixel puis, on affiche l'image résultante sous forme d'interférogramme. On effectue un calcul du déroulement de phase et une rectification géométrique pour déterminer l'altitude. Des études ont montré une haute précision (de l'ordre de quelques centimètres) avec des données aéroportées et de l'ordre de 10 m avec des données satellitaires.

Les applications primaires de l'interférométrie sont : la création de MNA de haute qualité, la surveillance des déformations de surface (la mesure de l'affaissement du terrain attribuable aux processus naturels, à l'extraction du gaz ou des eaux souterraines, au gonflement volcanique avant une éruption, aux mouvements relatifs de terrain causés par les tremblements de terre), l'évaluation des risques et la surveillance de structures naturelles et artificielles (un barrage, par exemple). Les données interférométriques seraient utiles aux

compagnies d'assurance pour mieux évaluer les dommages causés par les désastres naturels, ou pour les compagnies et les chercheurs spécialisés en hydrologie qui surveillent les embâcles de glace, pour la sécurité des ponts, les changements dans le bilan de masse des glaciers ou pour un suivi des transformations des volcans avant une éruption.



Les lignes de contours peuvent être générées à partir de MNA pour la production de cartes topographiques, de modèles de pente et d'orientation. Ceux-ci sont utilisés pour l'intégration avec des séries de données de classification thématique (utilisation du sol), pour la correction géométrique d'autres images ou pour la création de vues en perspective.



Exigences des données

La stéréogrammétrie et l'interférométrie requiert l'acquisition de deux images d'une même cible. La position du capteur doit être différente d'une acquisition à l'autre afin de produire des angles de visée légèrement différents.

Dans presque tous les MNA et toutes les applications de cartographie topographique, la précision cartographique s'avère le facteur le plus important. Le temps de livraison n'est pas crucial et la fréquence de répétitivité devient importante seulement pour les applications de détection des changements où le temps est un facteur clé.

Le Canada et les autres pays



Les photos aériennes constituent la source d'information de base pour la création de MNA au Canada. Pour d'autres applications, on peut utiliser d'autres données satellitaires comme par exemple, celles de SPOT avec ses capteurs orientables et sa résolution spatiale de l'ordre de 10 m en mode panchromatique, qui permet la production

d'information en altitude acceptable à une échelle inférieure à 1 / 50 000.

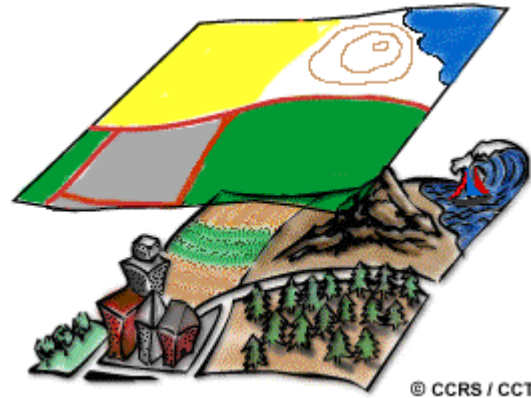
Au Canada, les exigences de précision pour les MNA sont de l'ordre de 5 à 20 m. Dans les pays en voie de développement, cette exigence est de 20 mètres. L'information originale sur l'altitude, utilisée dans la série de cartes topographiques nationales, a été obtenue par les techniques de photogrammétrie.

Pour les marchés extérieurs, la cartographie à partir de radar aéroporté est mieux adaptée pour la cartographie topographique à l'échelle de 1 / 50 000. Les systèmes radars spatioportés et la radargrammétrie peuvent produire des données moins précises pour la création de MNA dans les régions ennuagées ou dans celles qui n'ont pas besoin des données aussi précises. Il est possible d'obtenir des données stéréo dans la plupart des modes opérationnels grâce à la flexibilité des angles d'incidence de RADARSAT. Cette caractéristique permet l'acquisition d'un couple stéréo lors des passages subséquents. L'interférométrie à partir de systèmes aéroportés et spatioportés répond donc à plusieurs exigences de la cartographie.

5.8.3 Cartographie thématique et topographique

Contexte général

Il existe une demande croissante pour des bases de données d'information topographique et thématique numériques facilitant l'intégration et la mise à jour efficaces d'autres données spatiales. Les cartes topographiques contiennent les lignes de contours et des détails planimétriques d'échelles variées, et servent d'information de base pour les applications militaires et civiles.



La cartographie de l'information thématique de base est une intégration numérique d'images satellitaires, de cartes d'utilisation du sol, de cartes de couverture du sol et de données topographiques pour produire une "carte-image" avec des lignes de contours et de l'information planimétrique vectorielle. Ce nouveau concept de cartographie thématique a été développé pour mettre à profit les facteurs suivants :

1. l'amélioration des traitements numériques et de l'intégration d'informations spatiales
2. la compatibilité croissante des séries de données provenant de différentes sources
3. l'utilisation de système d'information géographique pour synthétiser l'information et pour effectuer des analyses personnalisées et
4. la facilité croissante de représentation des données sous forme cartographique.

Les données pour la cartographie thématique sont tirées des bases de données de topographie, d'infrastructure et d'utilisation du sol. L'information thématique appropriée est superposée sur une carte d'information de base, ce qui fournit de l'information détaillée pour les utilisateurs tels que les gestionnaires de ressources. Plusieurs combinaisons d'informations thématiques peuvent être présentées de façon à optimiser l'information cartographique pour des applications spécifiques telles que l'allocation de l'utilisation du sol, la sélection de site pour les services publics et la planification de routes, la gestion des bassins hydrographiques ou la gestion et les opérations des ressources naturelles.

Pourquoi la télédétection?

Comme carte d'information de base, les images offrent de l'information complémentaire aux détails planimétriques et thématiques. Sa sensibilité à l'expression du relief fait du radar un outil de choix pour la création de cartes d'information de base et de techniques de reconnaissance qu'utilisent les compagnies pétrolières et minières engagées dans l'exploration. Ceci est particulièrement vrai pour les régions arctiques où la couverture végétale ne cache pas la micro-topographie et pour lesquelles il n'existe pas beaucoup d'information. Les images multispectrales fournissent d'excellentes informations complémentaires sur la couverture du sol. L'intégration des données optiques au relief topographique et la nuance texturale des images radars produisent une image très utile pour l'interprétation.

Exigences des données

La première exigence est un contenu d'information élevé et un équilibre entre la résolution et la dimension des fichiers de données. Il faut aussi que les données soient traitées et disponibles moins d'un an après l'acquisition.

Le Canada et les autres pays

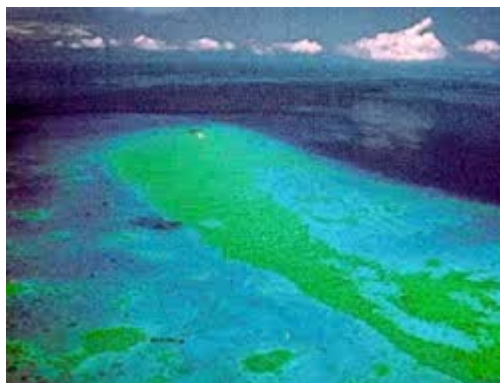
Les images VIR s'avèrent une excellente source d'information de base pour les détails planimétriques d'une région. Ces images fournissent de l'information sur les forêts, la couverture agricole et la géomorphologie du terrain. Le RSO fournit aussi une bonne expression de la topographie.

Étude de cas**Cartographie thématique d'information de base en Colombie-Britannique**

La cartographie thématique d'information de base utilise une compilation de données de sources variées allant des images satellitaires, à l'information détaillée sur les forêts, en passant par les données planimétriques provenant des cartes topographiques nationales à l'échelle de 1 : 250 000. Les feuillets des cartes d'information de base avec des combinaisons variées des données thématiques superposées sont produites pour les applications de gestion des ressources. Le ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie-Britannique produit de façon régulière ce genre de carte. Les données Landsat TM les plus récentes sont utilisées comme source pour la classification de la couverture du sol et pour l'interprétation de l'utilisation du sol. Les MNA sont aussi intégrés avec les données satellitaires pour produire une vue en trois dimensions. La Colombie-Britannique est chef de file dans ce type d'applications, cependant d'autres provinces canadiennes envisagent de faire, ou font déjà un travail semblable. Les compagnies forestières, quant à elles, comblent leurs besoins à ce niveau en faisant appel à des compagnies privées.

La cartographie thématique d'information de base incorpore non seulement les interprétations de la couverture et de l'utilisation du sol, mais aussi l'information topographique (les lignes de contours et la planimétrie) pour produire un outil optimal de gestion des ressources. Cette information peut être affichée sur une carte traditionnelle, ou sur une carte-image qui est une excellente façon de présenter les données spatiales aux gestionnaires de ressources et aux nombreux autres utilisateurs.

5.9 Oceans & Coastal Monitoring



En plus de constituer une importante source de nourriture et une immense ressource biophysique, les océans servent aussi de voies de transport, ils sont importants dans la formation des systèmes météorologiques et comme réservoirs à CO₂. Les océans sont un élément majeur dans l'équilibre hydrologique de la Terre. La compréhension de la dynamique des océans est importante pour l'évaluation des réserves de poissons, pour la planification du trajet des navires, pour la prédiction des conséquences sur la circulation atmosphérique de phénomènes comme El Nino, pour la prévision et la surveillance des tempêtes dans le but d'en réduire les impacts désastreux sur la navigation marine, pour l'exploration au large et pour le développement côtier. Les études de la dynamique des océans comprennent l'évaluation de la direction, de la vitesse et de la hauteur des vagues, l'identification des phénomènes d'échelle moyenne, la bathymétrie, la température de l'eau et la productivité des océans.

Les régions côtières sont sensibles aux changements environnementaux aux changements créés par le développement économique et aux changements d'utilisation du sol. Souvent, les côtes sont des zones à grande biodiversité, et peuvent être très urbanisées; 60 % de la population de la Terre habite près des océans. Les zones côtières sont donc des régions de plus en plus affectées par l'activité humaine. Les agences gouvernementales qui effectuent le suivi des activités humaines dans leurs régions, ont besoin de nouvelles sources de données pour surveiller les changements comme l'érosion côtière, la perte d'habitat naturel, l'urbanisation, la pollution. Les techniques de télédétection peuvent fournir des données pour des applications telles que la cartographie de la dynamique des océans et la surveillance des changements survenus aux régions côtières.

Voici quelques exemples d'applications aux océans :

- Identification des patrons océaniques :
 - courants, patrons de circulation régionale, zones de cisaillement
 - zones frontales, vagues internes, vagues de gravité, remous,
 - zones de résurgence, bathymétrie d'eau peu profonde
- Prévisions des tempêtes :
 - Évaluation du vent et des vagues
- Évaluations des réserves de poissons et des mammifères marins :
 - surveillance de la température de l'eau
 - qualité de l'eau
 - production océanique, concentration et dérive du phytoplancton
 - inventaire et surveillance de l'aquaculture
- Déversements d'hydrocarbures :
 - cartographie et prédiction de l'étendue et de la dérive des déversements
 - support stratégique pour la planification des opérations de secours
 - identification des régions de fuites naturelles pour l'exploration
- Transport maritime :
 - planification de routes
 - études de densité du trafic
 - surveillance des pratiques de pêche
 - bathymétrie des eaux peu profondes
- Zones intertidales :
 - effets des marées et des tempêtes
 - délimitation de l'interface terre-eau
 - cartographie des éléments côtiers
 - dynamiques des plages
 - cartographie de la végétation côtière
 - effet des activités anthropogéniques

5.9.1 Éléments océaniques

Contexte général

L'analyse des éléments océaniques comprend la détermination de la direction et de la force des courants, l'amplitude et la direction des vents de surface, la mesure de la température de la surface de la mer et l'exploration des interactions entre l'océan et l'atmosphère. La reconnaissance des courants, de la vitesse des vents, des marées, des signes de tempêtes et de la hauteur des vagues peut faciliter la planification de trajet pour les navires. La modélisation du fond des océans facilite les activités de planification d'extraction des ressources.

Les modèles de circulation océanique peuvent être déterminés par l'analyse des éléments d'échelle moyenne, tels que les remous et les vagues de gravité. Cette connaissance est utilisée pour la modélisation du climat terrestre, pour le suivi de la pollution, pour la navigation, et pour les planifications d'opérations au large.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection offre différentes méthodes d'acquisition d'information sur les océans et les régions côtières. Les scattéromètres mesurent la vitesse et la direction du vent, les altimètres mesurent la hauteur des vagues et déterminent la vitesse du vent. Le RSO est sensible aux variations spatiales des formes de rugosité de surface créées par l'interaction entre l'océan et l'atmosphère, alors que les radiomètres actifs et les sondes micro-ondes recueillent des données sur la température de la surface océanique. Des données recueillies par des bouées peuvent être combinées avec les données de télédétection pour produire une carte-image qui fournit des informations comme la structure d'un ouragan, avec la vitesse et la direction du vent et la hauteur des vagues. Cette information peut être utile pour les activités de constructions au large, pour la surveillance des activités de pêche et pour les opérations de prévisions des tempêtes.

Exigences des données

Pour l'information générale sur l'état de la mer (vagues, courants, vents), les données sont valables seulement si elles sont reçues au moment même où ces conditions sont présentes. La prévision et la planification de routes de navigation requièrent des données en temps réel, ce qui nécessite une liaison de transmission rapide des données dans les deux sens pour une communication efficace entre le centre de prévision et l'utilisateur.

La détection du signal de la surface océanique par les RSO nécessite certaines conditions de vitesse de vent. À de faibles vitesses de vent (2-3 m/s), le RSO n'est pas assez sensible pour détecter le fouillis océanique. À des vitesses de vent très élevées (plus que 14 m/s) le fouillis océanique masque les éléments de surface. L'intensité de la rétrodiffusion varie en fonction de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du radar, en plus des conditions de la mer au moment de l'acquisition. Le principal mécanisme de diffusion observé sur les images de la surface des océans est la diffusion de Bragg. Ce phénomène résulte de l'effet des vagues de courte longueur d'onde qui se propagent à la surface et qui créent des patrons qui varient

spatialement. Les vagues de surface qui produisent la diffusion de Bragg sont de la longueur d'onde utilisée par RADARSAT (5,3 cm). Ces petites vagues de surface sont généralement formées en réponse au stress du vent sur la couche supérieure de l'océan. La modulation des petites vagues de surface peut être causée par les longues vagues gravitationnelles, la variabilité de la vitesse du vent et les courants de surface associés aux processus océaniques de surface tels que les remous, les fronts, et les vagues internes. Les formes de rugosité de surface variant spatialement sont le résultat de ces conditions et sont perceptibles sur les images RSO.

Étude de cas

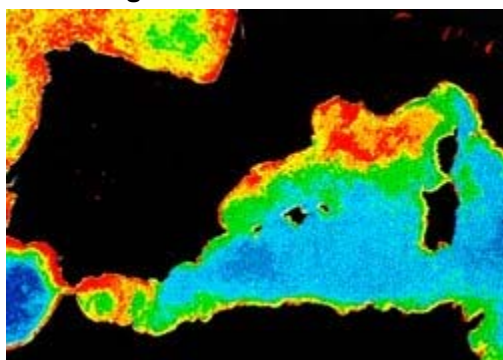


Les vagues internes se forment entre les couches d'eau de différentes densités d'eau, qui sont associées à des cisaillements de vitesse, (c.-à-d. où l'eau au-dessus et au-dessous de l'interface bouge en directions opposées ou dans la même direction, mais à des vitesses différentes). Les oscillations peuvent se produire si l'eau est déplacée verticalement, ce qui produit une vague interne. Les vagues internes se produisent généralement à des échelles variées et sont des phénomènes communs dans l'océan. Les vagues internes les plus importantes sont celles qui sont

associées à des oscillations de marées le long des marges continentales. Les vagues internes sont assez longues pour être détectées sur une image satellitaire. Sur cette image, les vagues internes se manifestent à la surface de l'océan comme des patrons répétitifs curvilignes de bandes foncées et pâles, et se situent à quelques kilomètres à l'est du détroit de Gibraltar qui joint l'océan Atlantique et la mer Méditerranée. De grandes quantités d'eau de l'océan Atlantique pénètrent dans la mer Méditerranée durant la marée haute et les tempêtes.

5.9.2 Couleur des océans et les concentrations de phytoplancton

Contexte général



L'analyse de la couleur de l'océan sert à déterminer la santé des océans en mesurant l'intensité de l'activité biologique par des moyens optiques. Le phytoplancton est une des pierres angulaires de la chaîne alimentaire mondiale. La chlorophylle, qui absorbe la lumière rouge (ce qui produit la couleur bleu-vert de l'océan), est considérée comme un bon indicateur de la santé de l'océan et de son niveau de productivité. La cartographie des patrons temporels et spatiaux de la couleur océanique à l'échelle

régionale et l'échelle du globe a donné un aperçu des propriétés et des processus fondamentaux du biotope marin.

La cartographie et la compréhension des changements dans la couleur de l'océan peuvent aider à la gestion des réserves de poissons et d'autres formes de vies aquatiques, à la définition des quotas de récoltes, à la surveillance de la qualité de l'eau, et permettent l'identification de la pollution humaine et naturelle (telle que les fuites de pétrole et les floraisons d'algues) nuisibles à la pisciculture et à la production de fruits de mer.

En général, la production océanique semble être plus élevée dans les régions côtières à cause de la proximité des zones de résurgence des substances nutritives et des conditions de circulation favorables à l'accumulation de nourriture.

Pourquoi la télédétection?

Les données de télédétection peuvent offrir la perspective nécessaire à la cueillette d'information sur la surface océanique, à l'échelle régionale. Les données optiques permettent de localiser des cibles comme les sédiments en suspension et la matière organique dissoute, et elles peuvent faire la différence entre les floraisons d'algues et les nappes d'hydrocarbures. Les données RSO fournissent de l'information supplémentaire sur le courant, les vagues, et les éléments d'échelle moyenne qui permettent d'observer les tendances temporelles, surtout durant les périodes d'ennuagement quand les données optiques ne sont pas disponibles. Plusieurs entreprises de pêche commerciale et d'aquaculture utilisent cette information pour prédire la grosseur des prises et pour localiser les endroits à fortes concentrations de nourriture.

La télédétection offre une vue de la surface de l'océan, mais elle est limitée dans la quantité d'information qu'elle peut obtenir sur la colonne d'eau. Cependant, plusieurs applications sur la couleur de l'océan sont encore au stade du développement. On prévoit que le développement et l'envergure des applications s'amélioreront considérablement avec les récentes et prochaines missions effectuées par les capteurs de pointe.

Exigences des données

Les données multispectrales sont requises pour la mesure de la couleur océanique, et une couverture spatiale étendue offre une vue synoptique de la distribution et de la variabilité spatiale du phytoplancton, de la température de l'eau, et de la concentration de la matière en suspension. Les données hyperspectrales (recueillies dans plusieurs bandes étroites du visible et de l'infrarouge) permettent une meilleure précision dans la classification de la réponse spectrale des cibles. Des images mensuelles et saisonnières sont nécessaires pour la modélisation. Pour la pêche et l'aquaculture, l'information est requise sur une base journalière ou hebdomadaire.

Une nouvelle ère débute pour les capteurs de données sur la couleur océanique. Le CZCS (Coastal Zone Colour Scanner) à bord de NIMBUS-7 a recueilli des données couleurs entre 1978 et 1986. Par la suite, en 1996, l'Allemagne a lancé le MOS (Modular Opto-electronic Sensor) et le Japon a suivi avec le OCTS (Ocean Colour Thermal Sensor). Mentionnons également d'autres nouveaux capteurs : le SeaWiFs lancé en 1997 par la NASA, MERIS de l'ASE dont le lancement est prévu pour 1999, le MODIS de la NASA qui sera lancé en l'an 2000, le GLI du Japon prévu pour 1999, et le OCI de Taiwan dès 1998. Ces capteurs recueilleront des données sur la production primaire, sur la variabilité de la chlorophylle, et sur la température de la surface de la mer en utilisant des algorithmes avancés. Leurs bandes spectrales ont été conçues pour maximiser la réflectance de la cible et pour supporter des mesures quantitatives de propriétés biophysiques spécifiques. La plupart de ces capteurs offrent des perspectives régionales à faible résolution (500-1200 m) et un champ de vision très large.

Étude de cas**El Niño et la disparition du plancton**

La compréhension de la dynamique de la circulation océanique joue un rôle important dans la prédiction des patrons climatiques mondiaux qui peuvent avoir des effets directs sur les productions de pêche et agricoles à l'échelle mondiale. La détection de l'arrivée du courant El Niño au large du Pérou est un exemple de la façon dont la télédétection peut être utilisée pour améliorer notre compréhension et la construction de modèles des patrons climatologiques à l'échelle du globe.

El Niño est un courant chaud qui apparaît au large du Pérou environ à tous les sept ans. Les substances nutritives dans l'océan sont associées aux zones de résurgence froides. L'arrivée d'un courant chaud comme El Niño, qui déplace le courant froid plus au large, cause des changements dans la migration des populations de poissons. En 1988, El Niño a causé la perte des réserves d'anchois près du Pérou. Le phénomène s'est par la suite déplacé vers le nord, ce qui a altéré les patrons climatiques régionaux et a créé un système météorologique instable. Les tempêtes qui s'en sont suivies ont poussé le jet-stream plus au nord, ce qui a bloqué le déplacement des précipitations continentales du Canada vers le centre des États-Unis. Les États américains centraux et de l'est ont été frappés par une sécheresse, ce qui a réduit la production agricole, et a augmenté le prix des produits alimentaires et des matières premières sur les marchés internationaux.

5.9.3 Détection de déversements d'hydrocarbures

Contexte général

Les déversements d'hydrocarbures sont néfastes pour la vie marine, en plus d'endommager l'habitat naturel des animaux terrestres et des humains. La plupart des déversements d'hydrocarbures sont le résultat des navires qui vident leurs réservoirs avant ou après l'entrée au port. Les déversements d'hydrocarbures de grande superficie sont le résultat de bris ou de collisions de pétroliers avec un récif ou un autre navire. Ces écoulements causent des dommages environnementaux sur d'immenses étendues et attirent l'attention des médias du monde entier. La surveillance régulière des voies de navigation et des régions côtières est nécessaire pour appliquer les lois sur la pollution maritime et pour identifier les contrevenants.

Suite à un déversement, l'opérateur du navire ou de la compagnie pétrolière est responsable de la mise sur pied d'équipes d'évaluation et de secours, et de la mise en place de mesures de contrôle pour en minimiser les effets et l'étendue. Si l'opérateur ou la compagnie ne possèdent pas les ressources nécessaires, les agences gouvernementales en charge du contrôle des désastres seront mises à contribution et géreront les activités. Dans tous les cas de déversements, les agences gouvernementales jouent un rôle important dans l'application des lois sur la protection de l'environnement. Pour limiter les régions affectées par le déversement et pour faciliter les efforts pour contrôler la nappe et le nettoyage, plusieurs facteurs doivent être identifiés :

1. la localisation de la nappe
2. le volume et l'étendue du déversement
3. la direction et la vitesse de déplacement de la nappe d'hydrocarbures
4. la direction des vents, des courants et des vagues pour la prédiction des mouvements ultérieurs.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection offre l'avantage d'être capable d'observer des événements dans des régions éloignées et souvent inaccessibles. Par exemple, les écoulements de pétrole d'un pipeline brisé peuvent passer inaperçus pour une période de temps à cause de l'incertitude dans la localisation du point exact de l'écoulement et des connaissances limitées sur l'étendue du déversement. La télédétection peut être utilisée pour trouver et surveiller les écoulements.

Pour les déversements océaniques, la télédétection peut fournir de l'information sur la vitesse et la direction du mouvement de la nappe d'hydrocarbures à partir d'images multitemporelles. Les données peuvent aussi être intégrées à des modèles de dérive et peuvent faciliter la planification des efforts de contrôle et de nettoyage. Les systèmes de télédétection utilisés sont : la vidéo infrarouge et les photos aériennes, les images infrarouges thermiques, les lasers fluoromètres aéroportés, les images optiques satellitaires, et les images RSO aéroportées et satellitaires. Les capteurs RSO ont un avantage sur les capteurs optiques, car ils peuvent acquérir des images durant la nuit et les journées ennuagées. Les utilisateurs de données de télédétection pour les applications aux déversements d'hydrocarbures sont la Garde côtière, les agences nationales de protection de l'environnement, les compagnies

pétrolières, l'industrie du transport maritime, les compagnies d'assurance, l'industrie de la pêche, les ministères des pêches et océans et le ministère de la défense.

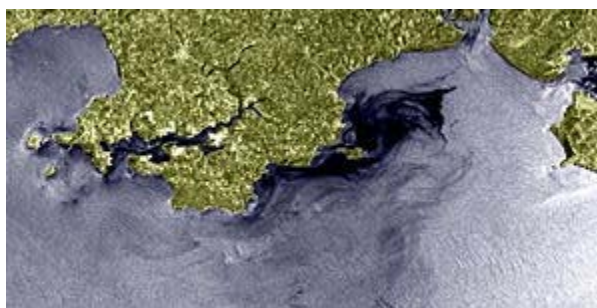
Exigences des données

Les exigences opérationnelles importantes sont la livraison rapide et l'acquisition d'images fréquentes du site pour la surveillance de la dynamique de la nappe. Pour l'identification des déversements, des capteurs à haute résolution sont généralement requis, bien qu'une couverture étendue est très importante pour la surveillance et la détection initiale. Les capteurs aéroportés ont l'avantage d'une couverture répétitive fréquente sur demande, mais à un coût élevé. Les déversements se produisent souvent lors de conditions météorologiques difficiles, ce qui nuit à la surveillance aérienne.

Les lasers fluoromètres sont les meilleurs capteurs pour la détection de déversements d'hydrocarbures. Ils peuvent identifier le pétrole sur les rives, sur la neige et sur la glace. Ils peuvent aussi identifier le type de pétrole dont il s'agit. Cependant, ces capteurs exigent des conditions météorologiques sans nuages pour détecter les déversements. Les capteurs RSO peuvent acquérir des images de nappes de pétrole par l'effet de suppression locale des ondes de Bragg. Les nappes sont visibles sur une image radar comme des taches circulaires ou curvilignes d'un ton plus foncé que la surface océanique environnante. La détection d'un déversement est fortement tributaire de la vitesse du vent. À des vitesses de plus de 10 m/s, la nappe sera fragmentée et dispersée, ce qui la rendra difficile à identifier. Un autre facteur rendant difficile la détection d'une nappe, c'est la difficulté de distinguer entre les surfactants naturels et une nappe d'hydrocarbures. Des données multitemporelles et auxiliaires aident à la différenciation des deux phénomènes.

Étude de cas

Le Sea Empress, un superpétrolier s'est échoué près de la ville de Milford Haven, au pays de Galles, le 15 février 1996. Après avoir frappé des rochers, la coque extérieure du navire a été percée et 70 000 tonnes de pétrole léger brut ont été dispersées vers le sud, dans des conditions de tempête.



Dans cette image RADARSAT acquise une semaine après le déversement, l'étendue de la nappe de pétrole est visible. Les tons foncés au large représentent les régions où le pétrole est présent et les régions de tons moins foncés, directement au sud, sont des régions où un dispersant a été vaporisé sur la nappe pour favoriser l'émulsion du pétrole. Le pétrole qui flotte sur la surface de l'eau

supprime les vagues capillaires de l'océan, ce qui crée une surface plus lisse que l'eau environnante. Cette surface lisse paraît foncée sur une image radar. Lorsque le pétrole commence à émulsionner et que les mesures de nettoyage ont commencé à faire effet, les vagues capillaires reviennent et le pétrole paraît plus clair. L'étendue, la localisation, et la dispersion de la nappe d'hydrocarbures peuvent être déterminées en utilisant ce genre d'images.



5. Notes finales

5.10 Notes finales



Vous venez de compléter le **Chapitre 5 - Applications**. Pour un suivi, vous pouvez fureter sur le site Web du CCT, où vous trouverez des articles ayant trait aux applications de la télédétection dans les domaines de l'agriculture, de la géologie, de la surveillance de l'environnement, de l'hydrologie, des glaces, des océans et de la foresterie. Comme point de départ, venez donc voir nos « [Images du Canada](#) »¹, the RADARSAT « [Applications en action](#) »², de RADARSAT, et une série d'articles dans notre [Technologie et R&D](#)³.

De plus, vous voudrez peut-être fureter dans la banque terminologique de notre [glossaire](#)⁴, ou revoir certaines [communications techniques](#)⁵ produites par le personnel du CCT.

¹http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tour/tour_f.html

²http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/imgact_f.html

³http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/rd_f.html

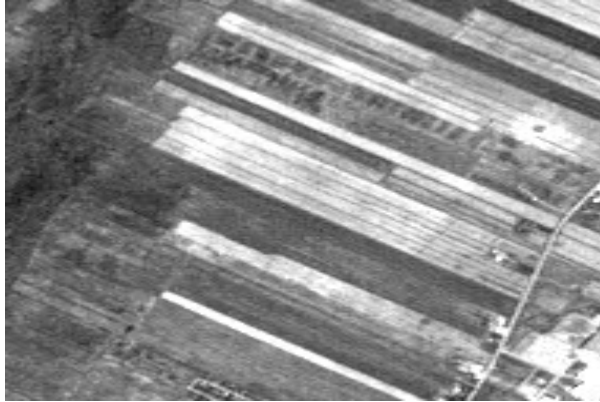
⁴http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary/glossary_f.html

⁵http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/sci_pub/biblio_f.html



5. Saviez-vous que?

5.2 Saviez-vous que?



Des champs au Québec (SPOT)

La télédétection des régions agricoles peut nous donner des indices de notre héritage... Au Québec, les champs des fermiers sont très différents des champs en Saskatchewan. Au Québec, les champs sont longs, étroits et s'étendent, en général, à partir de la rive d'un cours d'eau. Ce patron de colonisation française a été créé par le système seigneurial et se retrouve aussi au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse dans les communautés acadiennes, et dans certaines régions francophones de l'Ontario. Dans les prairies, les champs sont carrés et suivent le système anglais des cantons et des rangs.



Des champs au Saskatchewan (Landsat TM)

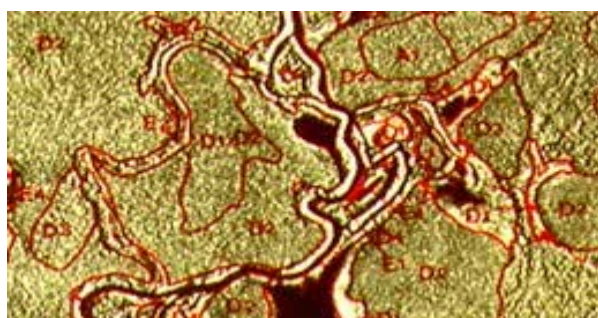
5.3 Saviez-vous que?



Forêts autour du Mont St Helens avant et après l'éruption

Les désastres naturels peuvent aussi anéantir de larges parties de forêts. Les feux peuvent détruire des milliers d'hectares, les glissements de terrain peuvent déplacer les arbres vers le bas des pentes, et les grands déluges peuvent endommager les arbres. Mais le plus grand potentiel de destruction des forêts dans le plus court laps de temps revient aux volcans. En 1980, le Mont St-Helens dans le nord-ouest des États-Unis est entré violemment en éruption. La décharge volcanique atteignant 320 km/heure s'est répandue au-dessus de 600 km² de forêt.

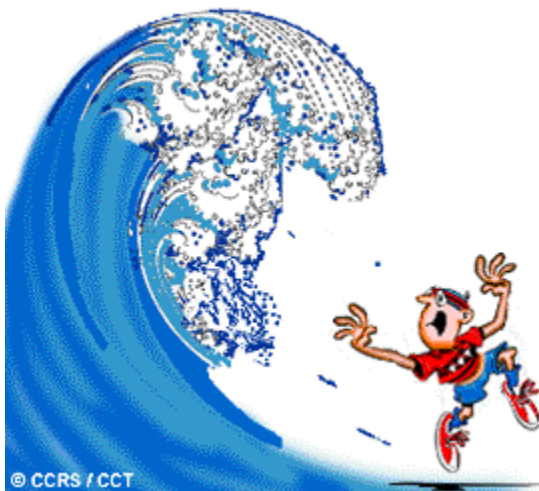
5.3.2 Saviez-vous que?



Interprétation forestière à partir de données RSO

L'interprétation du type de couvert forestier avec des données radars est très similaire à l'interprétation d'images multispectrales. Les mêmes éléments d'interprétation sont utilisés (ton, texture, forme, motif, grandeur, association), mais la texture joue un rôle de première importance dans la distinction des différents types de forêts. La visualisation des images en stéréo aide à différencier la hauteur relative des arbres et à définir les rivières qui ont une végétation spécifique sur leurs rives.

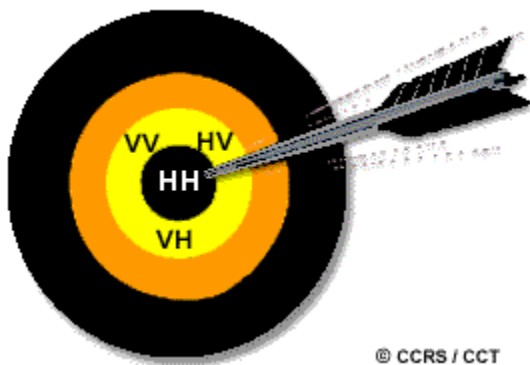
5.12 Saviez-vous que?



Les inondations catastrophiques peuvent survenir n'importe où. En Islande, des inondations énormes qui transportent des roches aussi grosses qu'une maison se produisent assez fréquemment. Ces inondations sont nommées jökulhlaups, ce qui signifie « inondations glaciaires ». L'Islande est située sur la dorsale médio-Atlantique, une région d'activité volcanique fréquente. L'île elle-même est un produit de cette activité et elle continue de grandir en superficie avec chaque éruption volcanique. Une calotte glaciaire de 8300 km² recouvre une grande partie de l'île et quelques cratères de volcans. Durant des éruptions sous-glaciaires, la glace du glacier fond et est emprisonnée dans le cratère ou la glace. De temps en temps, la pression de toute cette eau provoque une inondation catastrophique. Une inondation survenue en 1996 déversa un volume d'eau de 3 km³ sur une période de deux jours et demi. Les glaciers et le paysage se sont brusquement et fortement modifiés sous l'impact. L'eau creuse de nouveaux chenaux, transporte et dépose de gros blocs de roche et de glace, et forme des cônes alluviaux de plusieurs kilomètres.

Les scientifiques peuvent utiliser les images radars pour créer des modèles topographiques des glaciers et des champs d'épandage fluvio-glaciaire qui sont utilisés comme des cartes de base pour la détection des changements temporels et les études cartographiques. Le radar est préféré à cause de l'enneigement persistant au-dessus des glaciers qui limite l'utilisation des données optiques. Avec de nouvelles techniques de surveillance, comme l'analyse des dynamiques glaciaires reliées à l'activité volcanique, les scientifiques peuvent mieux prédire les violents jökulhlaups.

5.5.1 Le saviez-vous?



Il vaut la peine de vous attarder aux caractéristiques de polarisation des images radars dont vous faites l'acquisition. Par exemple, si vous désirez cartographier l'étendue d'une inondation, la polarisation HH (transmission horizontale et réception horizontale) est un meilleur choix que la polarisation VV (transmission verticale et réception verticale). L'image HH montrera un contraste beaucoup plus fort entre ces deux éléments, ce qui permet une meilleure précision de la cartographie résultante.

5.5.2 Le saviez-vous?

$$10^{-12} \text{ m} = 0.000000000001 \text{ m}$$

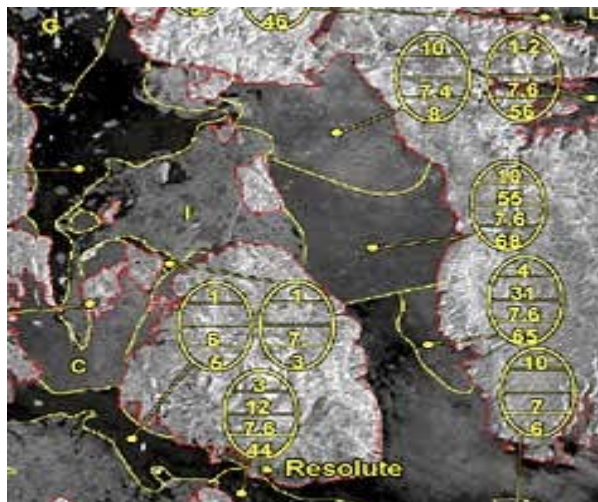
Pour la mesure du contenu en humidité du sol, on utilise aussi une autre partie du spectre électromagnétique: les rayons gamma. On utilise un enregistrement aéroporté de l'émission naturelle du rayonnement gamma de la Terre pour détecter les variations de l'intensité de l'émission du rayonnement produite par l'humidité contenue dans le sol. La longueur d'onde du rayonnement gamma est extrêmement courte, de l'ordre de 10^{-12} mètre et l'intensité de l'émission naturelle est très faible. C'est pourquoi il n'est pas pratique d'obtenir cette information d'une plate-forme satellitaire. Même lorsqu'on fait ce type d'acquisition à l'aide d'un avion, il faut que le survol soit fait aussi près du sol que possible.

5.6 Saviez-vous que?

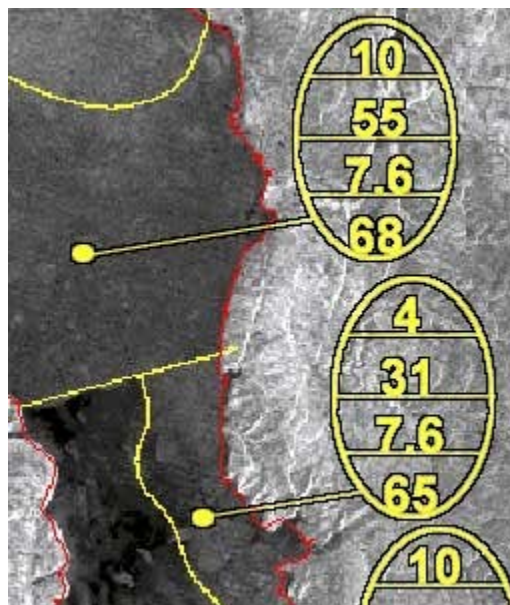


La possibilité d'accidents comme le naufrage du Titanic est presque complètement éliminée aujourd'hui avec la détection des icebergs (par la Patrouille Internationale des Glaces) et avec la navigation par GPS. Et si un navire entrait en collision avec un iceberg, l'utilisation de la télédétection et du GPS par les missions de sauvetage maritime pourrait sauver plusieurs vies.

5.6.1 Saviez-vous que?



Le Service canadien des glaces d'Environnement Canada (SCGEC) produit des cartes pour la classification des glaces qui sont distribuées à leurs clients presque en temps réel. Ces cartes sont essentiellement des cartes de glace avec des codes de l'oeuf surimposés. Ces codes expliquent le stade de développement (l'épaisseur), la dimension et la concentration de la glace aux échelles régionale et locale. Les codes utilisés pour représenter l'information sont affichés dans un symbole ovale ressemblant à un oeuf, d'où le terme Code de l'oeuf. Les codes de l'oeuf sont utilisés non seulement pour la glace de mer, mais aussi pour la glace de lac. Les codes sont aussi conformes aux normes du WMO (World Meteorological Organization).

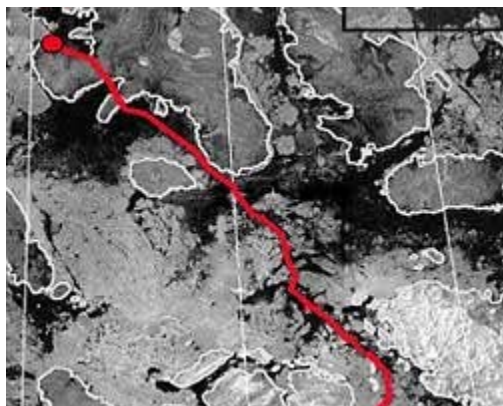


Une fois comprise la signification des codes, l'interprétation des cartes devient assez facile.

Pour plus de renseignements sur les codes et la terminologie, vous pouvez visiter le site Web du . [Service canadien des glaces](#)¹.

Étude de cas

RADARSAT guide une expédition au pôle nord magnétique!



En mars 1996, des équipes d'aventuriers polaires sont parties en expédition, avec comme but le pôle nord magnétique, situé sur la côte ouest de l'île Ellef Ringnes, dans l'Arctique canadien. Voyageant à ski sur la glace océanique, les équipes avaient besoin d'une route de glace lisse de première année pour transporter leurs équipements et pour conserver leur énergie. Dans le but d'éviter les blocs de glace rugueuse et un relief irrégulier composé de vieilles glaces déformées considérées quasi-impraticables, une équipe a utilisé la télédétection - des cartes créées à partir d'images RADARSAT- pour planifier

son itinéraire.

L'image ScanSAR couvrait l'étendue totale de la route, de Resolute Bay sur l'île Cornwallis jusqu'au pôle (78°6'N, 104°3'W). La résolution de 100 mètres de l'image a fourni de l'information sur la couverture et le type de glace, et les lignes côtières, ajoutées à la suite du traitement géométrique, ont fourni des points de repères géographiques. L'équipe était aussi munie de GPS et de systèmes de communication.

Sur cette carte, la glace praticable paraît uniformément foncée à cause de la réflexion spéculaire du rayonnement incident du radar sur la surface lisse. La glace en blocs et rugueuse, au relief impraticable pour le ski, paraît brillante à cause de la réflexion presque complète de l'énergie radar vers le capteur.

L'équipe utilisant les cartes produites à partir des images RADARSAT a été la seule à compléter le trajet. Les autres équipes ont été retardées par la glace rugueuse et elles n'ont pu planifier leur trajet de façon efficace sans l'aperçu synoptique de la télédétection. Grâce à sa sensibilité aux types de glace, à sa couverture de la région polaire et à la fiabilité de ses images, RADARSAT était le capteur tout indiqué pour cette application. Ce succès est de bonne augure pour les expéditions futures!

Référence:

Lasserre, M., 1996. Les cartes images RADARSAT, indispensables au succès de l'expédition dans l'Arctique «La télédétection au Canada» Vol. 24, No. 1, Juin 1996. Ressources Naturelles Canada.

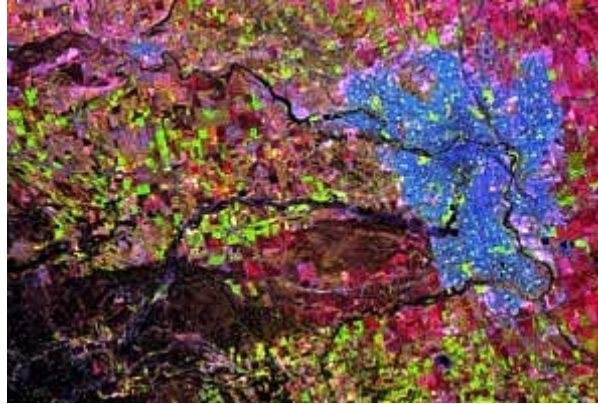
Site Web pour l'expédition : <http://www.jeaneudes.qc.ca/>²

¹<http://www.msc-smc.ec.gc.ca>

²<http://www.jeaneudes.qc.ca/>

5.7 Saviez-vous que?

« ...C'est pourtant parfaitement clair... »



Utilisation du sol à Calgary, Alberta

Voici une image de Calgary, au Canada, site des Olympiques d'hiver de 1988. La ville de Calgary apparaît en bleu ; les champs agricoles à l'est sont en rouge, et les pâturages à l'ouest apparaissent en vert. Au coin sud-ouest de la ville, on voit une longue section rectangulaire qui s'étend vers l'ouest et qui est plus foncée et plus uniforme que le reste des régions environnantes. On reconnaît cette région comme étant la réserve Sarcee (T'suu T'ina) qui appartient aux autochtones et qui est également protégée des développements résidentiels et d'urbanisation. De toute l'image, cette dernière région se rapproche le plus de ce qui était autrefois le paysage de la région de Calgary, avant l'agriculture et l'urbanisation. Cette région ressemble à un oasis au milieu des banlieues et des terres cultivées.

5.8.2 Le saviez-vous?



Lorsqu'on observe un couple d'images en stéréoscopie, on perçoit un modèle 3D virtuel de l'objet ou du terrain imagé. Par ce modèle 3D virtuel de terrain (MVT), il est possible d'extraire de l'information cartographique sans utiliser un MNT!

5.8.3 Le saviez-vous?



Il existe une méthode dérivée de la cartographie 3D d'un terrain que l'on appelle la "photogrammétrie rapprochée". Cette technique ressemble à une cartographie de terrain qui se ferait en étant rapproché de l'objet à observer. On utilise cette méthode pour la cartographie d'objets tels un édifice, une sculpture ou un visage humain en 3D afin de percevoir les caractéristiques précises de leur forme.

5.9.3 Le saviez-vous?

Un fluorodétecteur à laser typique émet une radiation d'une longueur d'onde bien précise qui est absorbée par la cible, par exemple de l'huile. L'énergie absorbée par la cible est ensuite ré-émise par la cible sous forme de radiation d'une autre longueur d'onde qui est ensuite détectée par un capteur (un spectromètre) relié au laser. Avec les hydrocarbures aromatiques, ce type de fluorescence permet une identification du type d'hydrocarbures par une mesure du spectre de radiation émise ainsi que le taux d'extinction de la fluorescence. Les hydrocarbures peuvent ainsi être différenciés des autres cibles fluorescentes et peuvent même être classifiées par type (huile lourde, huile légère, etc.).





5. Questions éclairs et réponses

5.2 Question éclair



À tous les printemps et dans le monde entier, de mystérieux cercles font leur apparition dans les champs agricoles. Certains y voient l'oeuvre d'extraterrestres. Ces cercles ont finalement, été captés par un système de télédétection ! Le satellite Landsat TM a acquis cette image au-dessus du sud de l'Alberta. Observez les cercles verts sur l'image et tentez d'expliquer leur formation si ce n'est par l'intervention des extraterrestres.

5.2 Réponses questions éclairs

Les cercles ne sont pas l'oeuvre d'extraterrestres ; ils représentent des récoltes en santé qui ont été arrosées par un système d'irrigation à pivot. Comme les prairies du sud du Canada sont plutôt sèches, les fermiers utilisent un système d'arrosage à pivot rotatif pour garder leurs récoltes en santé. L'on peut observer que les coins des champs hors de portée du système d'irrigation sont exempts de végétation ou presque. Les régions brun-gris dans l'image désignent surtout des pâturages, tandis que les récoltes sont vertes. Les récoltes peuvent être cultivées avec succès si une routine d'irrigation régulière est suivie, mais ceci risque d'épuiser les ressources d'eau dans cette région aride.

5.3 Question éclair



Pourquoi y a-t-il des lignes de coupe dans cette zone forestière du nord de l'Alberta?

5.3 Réponses questions éclair

Dans le nord de l'Alberta, les forêts sont non seulement coupées pour les pâtes et papiers, mais également pour une autre raison : l'exploration et les infrastructures des puits de gaz naturel qui exigent le déboisement pour les lignes sismiques, les gazoducs, l'accès aux sites et aux stations de pompage.

5.7 Questions Éclairs



Cercles encore plus étranges

Il y a des cercles encore plus étranges que ceux que nous avons vus auparavant. Les cercles extérieurs mesurent plus de dix kilomètres. Si l'on exclut les extraterrestres, qu'est-ce qui pourrait bien être à l'origine de cette forme de terrain et pour quel type d'utilisation du sol?

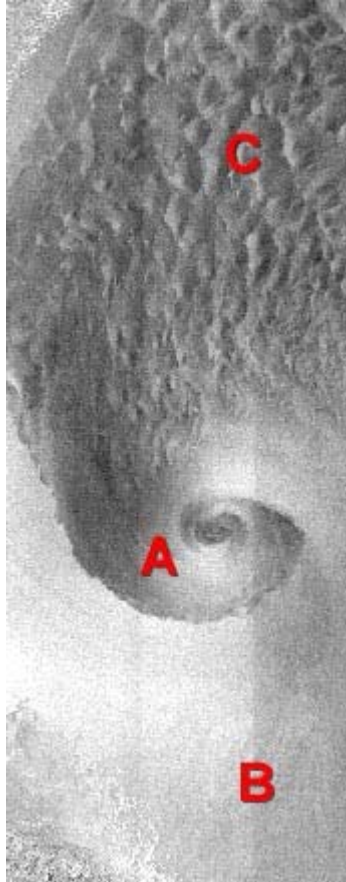
5.7 Réponses questions éclairs

Si vous avez pensé que ces cercles sont des traces laissées par d'anciennes civilisations, comme les Aztèques; ou qu'ils représentent la base d'un teepee géant, c'est un bel essai, mais ce n'est pas la bonne réponse. Essayez de nouveau.

Ces cercles sont situés sur une base militaire du sud de l'Alberta. Le terrain y est utilisé comme champ de manoeuvre et est "protégé" des activités de pâturage et de culture des environs. Ces cercles marquent la distance radiale du "point zéro" où les militaires ont effectué et simulé des explosions.

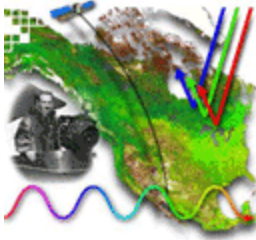
5.9.1 Question éclair

Mais qu'est ce que c'est que ces machins et comment RADARSAT peut-il les voir?



5.9.1 Réponses questions éclair

Cette image RADARSAT de la mer du Labrador nous montre une série de "taches" formées à la surface de l'océan par des conditions atmosphériques inhabituelles. Bien que le rayonnement radar en tant que tel ne soit pas affecté par l'atmosphère, il peut détecter les changements produits à la surface de l'océan par des phénomènes atmosphériques comme une cellule de basse pression (**A**), des vagues de gravité atmosphériques (**B**) et une zone de courants atmosphériques ascendants et descendants (**C**). Dans chaque cas, lorsque les masses d'air descendant réduisent les vagues, la rétrodiffusion radar est réduite (tons plus foncés). Par contre, les masses d'air ascendant produisent des vents de surface qui entraînent une augmentation de la hauteur des vagues, la rétrodiffusion radar est augmentée (tons plus brillants).



Crédits

Remerciements

Nous voulons remercier plusieurs organismes et individus qui ont contribué à ce cours tutoriel.

Une grande partie de ce cours a été préparé par [Intermap Technologies Ltd.](#) de Calgary et d'Ottawa, sous contrat au Centre canadien de télédétection et financé par l'Initiative en matière d'éducation et de formation des utilisateurs (IEFU). [RADARSAT International Inc.](#) et l'[Agence spatiale canadienne](#) détiennent les droits de la plupart des images présentées ici.

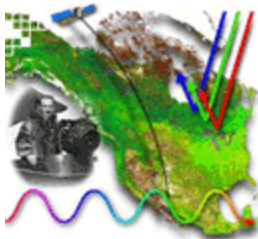
L'[équipe des applications multimédia du CCT](#) a produit les différentes versions en contribuant à la qualité du design, de l'édition du texte, des graphiques et au contrôle de la qualité de ce cours tutoriel.

Références

Les publications suivantes ont été utilisées pour la préparation de ce cours tutoriel :

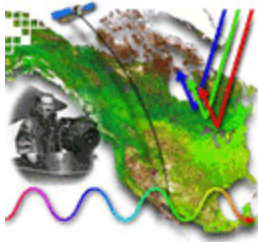
- Campbell, J.B. (1987) **Introduction to Remote Sensing**. The Guilford Press, New York.
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. (1994) **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Jensen, John R. (1986) **Introductory Digital Image Processing**. Prentice-Hall, New Jersey.
- Russ, John C. (1995) **The Image Processing Handbook**. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton.
- Dougherty, Edward R. and Charles R. Giardina (1987) **Matrix Structured Image Processing**. Prentice-Hall, New Jersey.
- **Computer Eye: Handbook of Image Processing**. Spatial Data Systems Inc., California.
- Jain, Anil K. (1989) **Fundamentals of Digital Image Processing**. Prentice-Hall, New Jersey.
- Wahl, Friedrich M. (1987) **Digital Image Signal Processing**. Artech House, Boston.
- Yu, Francis T.S. and Suganda Jutamulia (1992) **Optical Signal Processing, Computing, and Neural Networks**. John Wiley & Sons, New York.

- Canada Centre for Remote Sensing/Natural Resources Canada (1997). **GlobeSAR2 Radar Image Processing and Information Extraction Workbook Version 1.2.** Ottawa, Ontario, Canada.
- Barton, D. & S. Leonov (eds.) (1997) **Radar technology encyclopedia**, 511 p., Artec House, Norwood, MA, USA, ISBN 0-89006-893-3
- Oliver, C. & S. Quegan (1998) **Understanding synthetic aperture radar images**, 479 p., Artech House, Norwood, MA, USA, ISBN 089006850X.
- Werle D. (1988 and 1992) **Radar Remote Sensing - A Training Manual**, 193p, 75 35mm slides, Dendron Resource Surveys Ltd, Ottawa, Ontario, Canada, ISBN 0-9693733-0-9



Vous avez la permission

Ce cours tutoriel peut être reproduit sous diverses formes et il peut être utilisé à des **fins non commerciales** sous réserve que : **le contenu n'en soit pas altéré** et qu'il soit clairement indiqué que ce matériel provient du Centre canadien de télédétection.

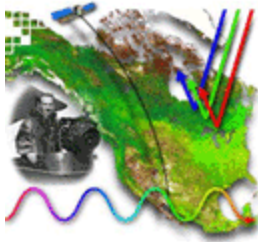


Formats de téléchargement

Formats de téléchargement

Le cours tutoriel est-il disponible en d'autres formats ? Puis-je utiliser plusieurs copies du cours tout en étant détaché du réseau ?

Si vous voulez imprimer une version de ce cours, alors téléchargez la [version PDF](#) et imprimez-la en couleurs. Le tutoriel peut être imprimé en format 8½" par 11" ou en format A4.



Notes pour les enseignants et les étudiants

Quel est le public cible de ce cours tutoriel?

Ce cours sur la technologie de la télédétection et ses applications est premièrement destiné aux étudiants de la fin du secondaire, du niveau collégial ou des premières années universitaires. Certaines notions en sciences, en mathématique ou en sciences de l'environnement sont un atout certain.

Que retrouve-t-on dans ce cours tutoriel ? Comment cela est-il relié au reste du site Web du CCT ?

Chaque section de ce cours tutoriel repose sur les concepts présentés dans les sections et chapitres précédents. Une grande quantité d'images et de graphiques ainsi que des faits intéressants servent à expliquer et à illustrer les concepts les plus difficiles. Chaque chapitre inclut également quelques questions ainsi que des quiz pour permettre au lecteur de vérifier sa compréhension de la matière. Ces mini-quiz constituent une excellente révision de chaque chapitre. Les pages "Saviez-vous que... ?" joignent l'humour à l'information pour vous apporter des anecdotes ou des faits pertinents à la section en cours en vous faisant voir les diverses utilisations de la télédétection à travers le monde.

Le matériel présenté dans le cours tutoriel prépare le lecteur à visiter et à réellement apprécier le site Web du CCT, où il pourra avoir accès à toute une gamme d'articles techniques et scientifiques sur la télédétection. Vous trouverez également sur le site Web du CCT un glossaire exhaustif de la terminologie de la télédétection et d'autres modules de formation qui pourront grandement intéresser les enseignants et les étudiants.

Le cours tutoriel est-il disponible en d'autres formats ? Puis-je utiliser plusieurs copies du cours tout en étant détaché du réseau ?

Nous disposons maintenant d'une copie du cours tutoriel «Notions fondamentales de télédétection» en format HTML qui peut être téléchargée par le biais du site FTP. Le cours a été compressé et formaté en [version zip](#) et a une dimension d'environ 5.2 Mo. Ce cours peut être téléchargé puis copié sur plusieurs ordinateurs pour usage en classe (non commercial) sans connexion Internet. Veuillez lire le document "lisezmoi.txt" pour connaître les contraintes et limitations à l'utilisation d'une telle copie.

Si vous voulez imprimer une version de ce cours, alors téléchargez la [version PDF](#) et imprimez-la en couleurs. Le tutoriel peut être imprimé en format 8½" par 11" ou en format A4.